



CONTRIBUTION DES DONNEES NOAA-AVHRR A LA CARACTERISATION DES SAVANES AFRICAINES

Valery Gond

► To cite this version:

Valery Gond. CONTRIBUTION DES DONNEES NOAA-AVHRR A LA CARACTERISATION DES SAVANES AFRICAINES: APPROCHE LOCALE, APPROCHE CONTINENTALE. Géographie. En vue de l'obtention du Doctorat de l'Université Toulouse le Mirail, 1999. Français. NNT: . tel-01239710

HAL Id: tel-01239710

<https://shs.hal.science/tel-01239710>

Submitted on 8 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Contribution Des Donnees NOAA-AVHRR
a la Caracterisation Des Savanes
Africaines**



UNIVERSITE TOULOUSE LE MIRAIL

GEODE
GEOGRAPHIE DE L'ENVIRONNEMENT

URA 544 CNRS
UNITÉ DE RECHERCHE ASSOCIÉE
AU CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

THESE

présentée par Valéry GOND

En vue de l'obtention du Doctorat de l'Université Toulouse le Mirail

Discipline : Géographie et Aménagement
Spécialité : Télédétection spatiale

CONTRIBUTION DES DONNEES NOAA-AVHRR A LA CARACTERISATION DES SAVANES AFRICAINES

APPROCHE LOCALE, APPROCHE CONTINENTALE

JURY :

Alan BELWARD, Ingénieur CCR Ispra
Georges BERTRAND, Professeur de l'Université Toulouse le Mirail
Bernard CHARLERY, Professeur de l'Université Toulouse le Mirail
Jacques FONTES, Ingénieur de Recherche CNRS, LET, Université Paul Sabatier
Jacques HUBSCHMAN, Professeur de l'Université Toulouse le Mirail
Jean-Claude MENAUT, Directeur du laboratoire d'Ecologie de l'ENS Paris
Gilbert SAINT, Ingénieur CNES Toulouse et CCR Ispra

IFRA



IFRA000302

No. d'inventaire	
Date	10/12/99
Cote	AF / GON T 634.9

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	I
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES ACRONYMES	VII

INTRODUCTION	1
---------------------------	----------

0.1 - PROBLEMATIQUE D'ENSEMBLE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE	2
0.1.1 - Problématique	2
0.1.2 - Contexte scientifique	4

0.2 - OBJECTIFS ET METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE	5
--	----------

CHAPITRE 1 : LE CADRE GEOGRAPHIQUE : savanes et forêts d'Afrique de l'Ouest	9
--	----------

1.1 - LES GRANDS TRAITS DU CLIMAT DE L'AFRIQUE DE L'OUEST	11
--	-----------

1.2 - LE DOMAINE GUINEEN	14
1.2.1 - La forêt pluvieuse Guinéo-Congolaise et le domaine de mousson permanente	14
1.2.2 - La savane guinéenne ou le contact forêt-savane	16

1.3 - LE DOMAINE SOUDANIEN	17
1.3.1 - Les forêts claires soudaniennes et le domaine sud-soudanien	18
1.3.2 - Les savanes soudaniennes	19
1.3.3 - Les savanes nord soudaniennes	20

1.4 - LE DOMAINE SAHELIEEN	21
1.4.1 - La steppe sahélienne	21
1.4.2 - Le domaine péri-désertique	23

CHAPITRE 2 : APPROCHE LOCALE : identification des savanes de Bondoukouy à partir des données AVHRR	24
---	-----------

2.1 - OBJECTIFS	25
------------------------------	-----------

2.2 - CARACTERISTIQUES GENERALES DU SITE DE BONDOUKOUY	26
2.2.1 Localisation générale.	26
2.2.2 Repérage cartographique.	26
2.2.3 Aperçus géologique, géomorphologique et pédologique.	27
2.2.4 Les grands traits du paysage et de l'exploitation humaine de Bondoukouy.	30
2.2.4.1 Trois ensembles majeurs	30
2.2.4.2 L'impact anthropique	31

2.2.5 Activité pluviométrique de 1990-1991	31
2.3 - DONNEES ET METHODOLOGIE DE TRAITEMENT	34
2.3.1 Les données AVHRR	36
2.3.1.1 Les données brutes	36
2.3.1.2 Calibrations et corrections atmosphériques	36
2.3.1.3 Corrections géométriques	37
2.3.1.4 Extraction de la fenêtre de travail	38
2.3.1.5 Elimination des nuages : le filtrage thermique INTUITIV	39
2.3.1.6 Calcul du NDVI	40
2.3.1.7 Lissage des courbes temporelles : le filtrage BISE	41
2.3.1.8 Classification des données NDVI-AVHRR	42
2.3.1.9 Principe de caractérisation du cycle phénologique	44
2.3.2 Les données SPOT et leur exploitation	47
2.3.2.1 La classification thématique de l'ORSTOM	47
2.3.2.2 Rectification géométrique de la classification de l'ORSTOM	47
2.3.2.3 Analyse comparative visuelle des classifications AVHRR et SPOT	49
2.4 - IDENTIFICATION ET ANALYSE DES PIXELS AVHRR HOMOGENES	49
2.4.1 Méthode d'analyse des pixels temporels AVHRR	49
2.4.2 - Recherche des pixels homogènes	50
2.4.2.1 Répartition des classes SPOT dans les classes AVHRR	50
2.4.2.2 Identification des pixels homogènes	54
2.4.2.3 Regroupement des pixels AVHRR homogènes par classe AVHRR	54
2.4.2.4 Analyse comparée du comportement temporel des classes AVHRR et des pixels AVHRR homogènes	61
2.4.2.5 Analyse du comportement temporel des classes AVHRR et de la moyenne des classes AVHRR	62
2.5 - ANALYSE DES PARAMETRES PHENOLOGIQUES DES COURBES TEMPORELLES NDVI DES CLASSES AVHRR	72
2.5.1 Définition des paramètres phénologiques	73
2.5.2 Mesure des paramètres phénologiques	73
2.5.3 Résultats de l'analyse des paramètres phénologiques	75
2.5.3.1 Caractérisation des classes AVHRR par paramètre phénologique	75
2.5.3.2 Hiérarchisation des classes AVHRR selon chaque paramètre phénologique	76
2.5.3.3 Hiérarchisation des classes AVHRR selon la combinaison des paramètres phénologiques	77
2.5.3.4 Regroupement des classes AVHRR selon l'indice de hiérarchisation globale	78
2.5.3.5 Regroupement des classes AVHRR dans l'espace bidimensionnel des paramètres phénologiques	78
2.5.3.6 Conclusion	81
2.5.4 Spatialisation, interprétation et signification des grands ensembles de classes AVHRR	82
2.5.4.1 Interprétation de l'image des grands ensembles de la fenêtre de Bondoukouy	82
2.5.4.2 Les grands ensembles à l'échelle de la région de Bondoukouy	85
2.6 - CONCLUSION	86

CHAPITRE 3 : APPROCHE CONTINENTALE : la spatialisation à l'échelle de l'Afrique	88
3.1 - OBJECTIFS GENERAUX	89
3.2 - LES GRANDES ETAPES DE LA CARTOGRAPHIE GLOBALE DE LA VEGETATION D'AFRIQUE	89
3.2.1 Les premières approches de la biogéographie africaine	89
3.2.2 La phase d'investigation approfondie	90
3.2.3 Les premiers apports de la télédétection	90
3.3 - DONNEES ET METHODOLOGIE UTILISEES	91
3.3.1 Données	91
3.3.1.1 Les données AVHRR à 15 km de résolution	91
3.3.1.2 Les données SPOT du programme SALT	92
3.3.1.3 Les cartographies de terrain SALT	92
3.3.2 - Méthodologie	93
3.3.2.1 Adaptation des pré-traitements aux données GVI	93
3.3.2.2 La classification par nuées dynamiques de l'Afrique	95
3.3.2.3 Logique chromatique de la restitution cartographique	96
3.4 - ANALYSE DES RESULTATS	96
3.4.1 - Description des comportements et relations avec les grands biomes	96
3.4.1.1 Le domaine saharien	99
3.4.1.2 L'ensemble sub-saharien à gradient régulier nord - sud	99
3.4.1.3 L'ensemble à gradient en auréole du Kalahari	100
3.4.1.4 La corne orientale de l'Afrique	102
3.4.1.5 Suivi de la dynamique de la végétation africaine 1986 - 1990	103
3.4.2 - Les domaines de savane de l'Afrique Occidentale	104
3.4.2.1 Le transect SALT: un pôle de validation	104
3.4.2.2 Identification des différents types de savane de l'Afrique de l'ouest par leur comportement temporel	107
3.4.3 - Dynamique pluriannuelle des savanes de l'Afrique de l'ouest	109
3.5. CONCLUSION	111
4 - CONCLUSION GENERALE	112
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	116
ANNEXES	123
Annexe A - Caractéristiques générales liées aux capteurs et satellites NOAA.	124
Annexe B - Le satellite SPOT	130
Annexe C - La classification automatique (Viovy N., 1990)	133
Annexe D - Article à paraître dans "Journal of Hydrology"	137
Annexe E - Tableau de répartition des pixels homogènes AVHRR dans les classes SPOT	150

Tableaux

Tableau 1-1 Données climatiques de quelques stations d'Afrique de l'ouest	12
Tableau 2-1 Répartition (en %) des classes SPOT dans les classes AVHRR	53
Tableau 2-2 Valeur des paramètres phénologiques des classes AVHRR	75
Tableau 2-3 Hiérarchisation des classes AVHRR en fonction des paramètres phénologiques	76
Tableau 2-4 Hiérarchisation des 16 classes AVHRR	77
Tableau 3-1 Correspondance des sites SALT et des classes AVHRR-GVI	106
Tableau 3-2 Paramètres phénologiques des différentes classes de savanes	109

Figures

0-1 Localisation des sites SALT en Afrique de l'Ouest	6
0-2 Schématisation de la démarche d'ensemble de l'étude	8
1-1 Carte de la végétation AETFAT	10
1-2 Les grands domaines climatiques d'Afrique de l'ouest	13
1-3 Un aspect de la forêt pluvieuse guinéo-congolaise secondaire	15
1-4 La savane à Rôniers à Lamto (Côte d'Ivoire)	16
1-5 La savane soudanienne au sud du Burkina-Faso	19
1-6 Aspect de la savane nord soudanienne	20
1-7 Steppe sahélienne à l'est du Mont Hombori	22
2-1 Localisation du site d'étude de Bondoukouy (Burkina-Faso)	26
2-2 Carte Géologique (lithologie) de la région de Bondoukouy	28
2-3 Carte pédologie de la région de Bondoukouy	29
2-4 Extrait de la carte de végétation de Fontès J.	30
2-5 Carte des zones agricoles de la région de Bondoukouy (vallée du Mouhoun)	32
2-6 Histogramme des précipitations de 90-91 à Bondoukouy	33
2-7 Démarche de traitement suivie dans l'approche locale (Bondoukouy)	35
2-8 Courbes temporelle NDVI après filtrage (INTUITIV) et lissage (BISE)	43
2-9 Principe de la classification automatique	44
2-10 Classification NDVI (NOAA-AVHRR) par nuées dynamiques	45
2-11 Evolution temporelle d'un pixel	46
2-12 Classification SPOT du site SALT de Bondoukouy	48
2-13 Répartition des classes SPOT dans les classes AVHRR	51
2-14 Répartition des 14 classes SPOT dans les 16 classes AVHRR	52
2-15 Classe AVHRR 1 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	55
2-16 Classe AVHRR 2 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	56
2-17 Classe AVHRR 3 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	57
2-18 Classe AVHRR 4 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	58
2-19 Classe AVHRR 9 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	59
2-20 Classe AVHRR 13 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes	60
2-21 Courbes temporelles NDVI des classes AVHRR	63
2-22 Extraction des paramètres sur les cycles de développement de la végétation	74
2-23 Regroupement des classes AVHRR	78
2-24 Regroupement des classes AVHRR en fonction de la durée totale du cycle et du jour de démarrage du cycle	79

2-25 Regroupement des classes AVHRR en fonction de la durée totale du cycle et de la période de croissance	80
2-26 Regroupement des classes AVHRR en fonction de la durée de la croissance végétale et du jour de démarrage du cycle	80
2-27 Classes AVHRR et grands ensembles de classes AVHRR à Bondoukouy	83
2-28 Correspondance entre ensembles de classes AVHRR et structure géomorphologique du site d'étude de Bondoukouy:	85
3-1 Représentation des différents pré-traitements des données AVHRR-GVI	93
3-2 Démarche de traitement des données AVHRR à l'échelle continentale africaine	94
3-3 Amélioration de la cartographie temporelle AVHRR	95
3-4 Classification temporelle AVHRR-GVI (1986-1990)	97 & 98
3-5 Cartes annuelles de la végétation africaine	105
3-6 Evolution des comportements temporels le long du transect central SALT.	105
3-7 Site SALT de Ouango-Fitini (Côte d'Ivoire)	107
3-8 Dynamique pluriannuelle du site SALT de Bidi-Bahn (B-F)	110

Acronymes

AETFAT : Association pour l'Etude Taxonomique de la Flore de l'Afrique Tropicale
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer
BAHC : Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle
BISE : Best Index Slope Extraction
BRDF : Bidirectional Reflectance Distribution Function
CCD : Charge Coupled Device
CESBIO : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère
CN : Compte Numérique
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CRIS : Centre de Rectification des Images Spot
DIS : Data and Information System
ENS : Ecole Normale Supérieure
EOS : Earth Observation System
ER-MAPPER : Earth Resource Mapper
ESA : European Space Agency
ESRIN : European Space Research Institute
FIT : Front Inter-Tropical
GAF : Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung
GCTE : Global Change and Terrestrial Ecosystems
GEMI : Global Environment Monitoring Index
GOES : Geosynchronous Operational Environmental Satellite
GPS : Ground Position System
GVI : Global Vegetation Index
HAPEX : Hydrologic Atmospheric Experiment for study of water budget and evaporation flux
HIRS : High resolution Infra-red Radiation Sounder
HRPT : High Resolution Picture Transmission
HRV : Haute Résolution Visible
IGAC : International Global Atmospheric Chemistry
IGBP : International Geosphere Biosphere Program
INTUITIV : Improving NDVI Time-series Using Imposed Threshold on Irt, Ir and Visible values
IPAR : Intercepted Photosynthetically Active Radiation
IR : Infra-Red
IRT : Infra-Rouge Thermique
LAI : Leaf Area Index
LERTS : Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale
MSAVI : Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MSU : Microwave Sounding Unit
NASA : National Aeronautics and Space Administration
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
NIR : Near Infra-Red
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Agency
ORSTOM : Institut Français de Recherches Scientifiques pour le Développement en coopération
PHOTONS : PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire

SALT : Savanes A Long Terme
SARSAT : Search and Rescue Satellites Aided Tracking System
SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index
SBUV : Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer
SHARP : Standard HRPT Archive Request Product
SMAC : Simplified Method for Atmospheric Correction
SPOT : Système Pour l'Observation de la Terre
SSU : Stratospheric Sounding Unit
TIROS : Television and Infrared Observation Satellite
TOVS : Tiros Operational Vertical Sounder
UNESCO : United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
UNSO : United Nations Sudano-Sahelian Office
UTM : Universal Transverse Mercator
VMI : Vegetation Monitoring Instrument
ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

INTRODUCTION

0.1 - PROBLEMATIQUE D'ENSEMBLE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE

0.1.1 - Problématique

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la surveillance des grands écosystèmes et de leur évolution, par télédétection satellitaire. Les observations satellitaires acquises permettent en effet de couvrir plus ou moins complètement et d'une façon répétitive de vastes biomes. De ce fait, l'évolution des couvertures végétales et des types d'occupation ou d'utilisation au sol peut être étudiée, notamment dans la zone intertropicale où des changements rapides se manifestent depuis quelques dizaines d'années. C'est le cas, bien entendu, pour les forêts pluvieuses, mais aussi pour les écosystèmes de savanes - objet de notre travail - qui couvrent plus de 30 millions de km² de la surface des continents dont environ 5 millions dans la seule Afrique de l'ouest (Menaut J-C., 1993). Compte tenu de la fragilité des savanes, de leur sensibilité aux processus de dégradation / désertification, les problèmes de surveillance prennent aujourd'hui toute leur importance dans la perspective du "changement climatique global".) ?

C'est dans ce contexte de "changement climatique global" que, pour mieux caractériser l'évolution de vastes écosystèmes, l'utilisation des données de télédétection à basse résolution spatiale s'est largement développée depuis le début des années 80. C'est le cas pour les données fournies par les satellites Meteosat et, plus particulièrement, par NOAA-AVHRR¹. D'une part, ces observations constituent une source d'information bien ajustée aux échelles régionales ou continentales. D'autre part, leur haute résolution temporelle permet d'étudier la dynamique des écosystèmes selon un pas d'échantillonnage beaucoup plus fin que celui des capteurs à haute résolution spatiale. Les caractéristiques de ces données en font ainsi des outils particulièrement bien adaptés aux études de suivi global et continu de la couverture végétale : la prochaine mise en service de SPOT 4, avec son instrument *VEGETATION*, vient précisément souligner tout leur intérêt (Saint G., 1995).

Néanmoins, les données à basse résolution spatiale livrent des informations de nature

1. cf Annexe A. Les sigles utilisés sont développés dans la liste des acronymes page VII.

sensiblement différentes de celles fournies par les capteurs à haute résolution spatiale tels Landsat Thematic-Mapper, ou SPOT HRV¹. En effet, ces derniers permettent généralement de rendre compte convenablement de la structure paysagère et de la répartition spatiale des principaux types de couverture végétale, sensiblement comparables aux cartes obtenues par relevés au sol (Serpantié G., *et al.*, 1991). A l'inverse, les données AVHRR à basse résolution spatiale sont, dans la plupart des cas, incapables de fournir à elles seules une représentation satisfaisante - à leur échelle propre - de ces mêmes caractères, en raison notamment de la difficulté à interpréter la signification des valeurs radiométriques moyennes du pixel AVHRR. En revanche, leur résolution temporelle élevée rend possible une bonne restitution du comportement spectral des surfaces observées selon un pas de temps bien adapté à l'étude des écosystèmes.

L'importance de l'écart entre résolutions (d'un facteur 55 entre SPOT HRV à 20 mètres et NOAA AVHRR à 1,1 km) rend particulièrement délicate la mise en correspondance entre les deux ensembles de données. C'est là une illustration classique de la problématique de l'intégration d'échelle spatiale en télédétection. A cela s'ajoute le fait que les images à haute résolution spatiale sont sinon toujours monotemporelles, du moins, dans le meilleur des cas, rarement issues du traitement d'un grand nombre d'images. Au contraire, les images AVHRR, tirant parti de la répétitivité élevée des capteurs et des performances actuelles des systèmes de traitement peuvent, comme c'est le cas dans notre travail, résulter du traitement de longues séries d'images acquises de façon quasi continue. Le changement d'échelle spatiale se double ainsi d'un changement d'échelle temporelle, qui doit également être pris en considération dans la mise en correspondance entre les deux ensembles de données.

Améliorer la compréhension des données multitemporelles à basse résolution spatiale, notamment à travers leurs relations avec les images à haute résolution spatiale, représente donc un problème majeur, tant sur le plan scientifique que sur le plan opérationnel et apparaît ainsi comme une étape fondamentale pour la connaissance des écosystèmes et de leur évolution. Notre travail s'inscrit pleinement dans ce contexte et dans la perspective du lancement prochain du satellite SPOT 4 et du programme *VEGETATION*¹ qui lui est associé.

1. cf Annexe B.

0.1.2 - Contexte scientifique

La présente étude s'insère dans le champ de deux grands programmes de recherches sur l'environnement, aux objectifs imbriqués : IGBP et SALT

- l'IGBP (International Geosphere Biosphere Program, Report n°12, 1990) est un programme international qui coordonne l'ensemble des recherches sur l'environnement global. Sa finalité est la compréhension du fonctionnement et de l'évolution de la Terre. Ce programme scientifique a été mis en place pour étudier et modéliser les interactions entre les processus physiques, chimiques et biologiques d'origine naturelle ou anthropiques qui régissent le fonctionnement et la dynamique du système Terre. L'IGBP est structuré en huit sous programmes principaux, dont trois d'entre eux sont particulièrement concernés par la thématique du "land cover change":

- GCTE (Global Change and Terrestrial Ecosystems), qui a pour objet l'étude des écosystèmes terrestres.

- BAHC (Biospheric Aspects of the Hydrological Cycle) dont la finalité est d'analyser les propriétés de surface par la mesure des flux d'eau et d'énergie à l'échelle régionale.

- IGAC (International Global Atmospheric Chemistry) dont les recherches portent sur les perturbations atmosphériques d'origines chimiques, dont celles provoquées par les feux de brousses et la déforestation.

- SALT (Savanes à Long Terme) est un programme français soutenu conjointement par le CNRS, le CNES et l'ORSTOM, essentiellement centré sur l'étude des écosystèmes savaniques d'Afrique de l'ouest (Menaut, J-C., Podaire, A., 1990). Les recherches couvrent en fait un très large éventail et portent essentiellement sur la structure, le fonctionnement et la dynamique des savanes (Menaut, J-C., 1992). La caractérisation des paramètres de surface par l'étude de la variabilité spatiale et temporelle de ces écosystèmes, constitue l'une des finalités importantes de ce programme qui se rattache ainsi aux différents objectifs des principaux projets évoqués ci-dessus. Comme pour l'ensemble des recherches relevant de la thématique

du “land cover change”, l’analyse de la structure et de la dynamique de ces savanes africaines implique la prise en compte des problèmes liés aux différents niveaux d’observation, à l’emboîtement d’échelles spatiales des phénomènes et à la nécessité de croiser les échelles temporelles et spatiales. C’est précisément à cette orientation de recherche que peut être rattachée notre étude.

Pour réaliser ces objectifs, le programme SALT dispose de huit stations écologiques expérimentales de terrain, permettant de mieux connaître, caractériser et cartographier à l’échelle locale les principaux types de milieux savanicoles (Figure 0-1). Ces sites ont une importance capitale dans le déroulement du projet dans la mesure où ils servent d’appui logistique aux études écologiques et de références sur le terrain pour les études menées en télédétection. C’est l’un de ces sites SALT qui a servi de cadre à nos recherches conduites à l’échelle locale.

0.2 - OBJECTIF ET METHODOLOGIE GENERALE DE L'ETUDE

Notre travail a pour objectif central l’identification des écosystèmes de savane ou, plus concrètement, des types de couverture végétale et d’occupation du sol en domaine de savane, à partir du comportement phénologique de la végétation, déduit de la variation temporelle d’un indice de végétation, comme le NDVI¹. Il est défini à partir des valeurs radiométriques des pixels AVHRR. C’est donc l’information du pixel AVHRR qu’il s’agit de caractériser et d’interpréter.

Pour caractériser l’information contenue dans le pixel AVHRR, il sera fait appel à l’analyse temporelle inspirée des travaux de N. Viovy (1990) et à une classification par nuée dynamique adaptée, dans notre cas, aux données NDVI à 1 km. Cette technique permet en effet de regrouper les pixels ayant un même comportement temporel caractéristique de l’activité chlorophyllienne. De cette information phénologique spatialisée, il faut alors passer à une information “thématique” spatialisée, c’est-à-dire associer aux classes temporelles AVHRR un type de savane donné.

1. $NDVI = (Proche\ Infrarouge - Visible) / (Proche\ Infrarouge + Visible)$. (Rouse J., *et al.*, 1974)

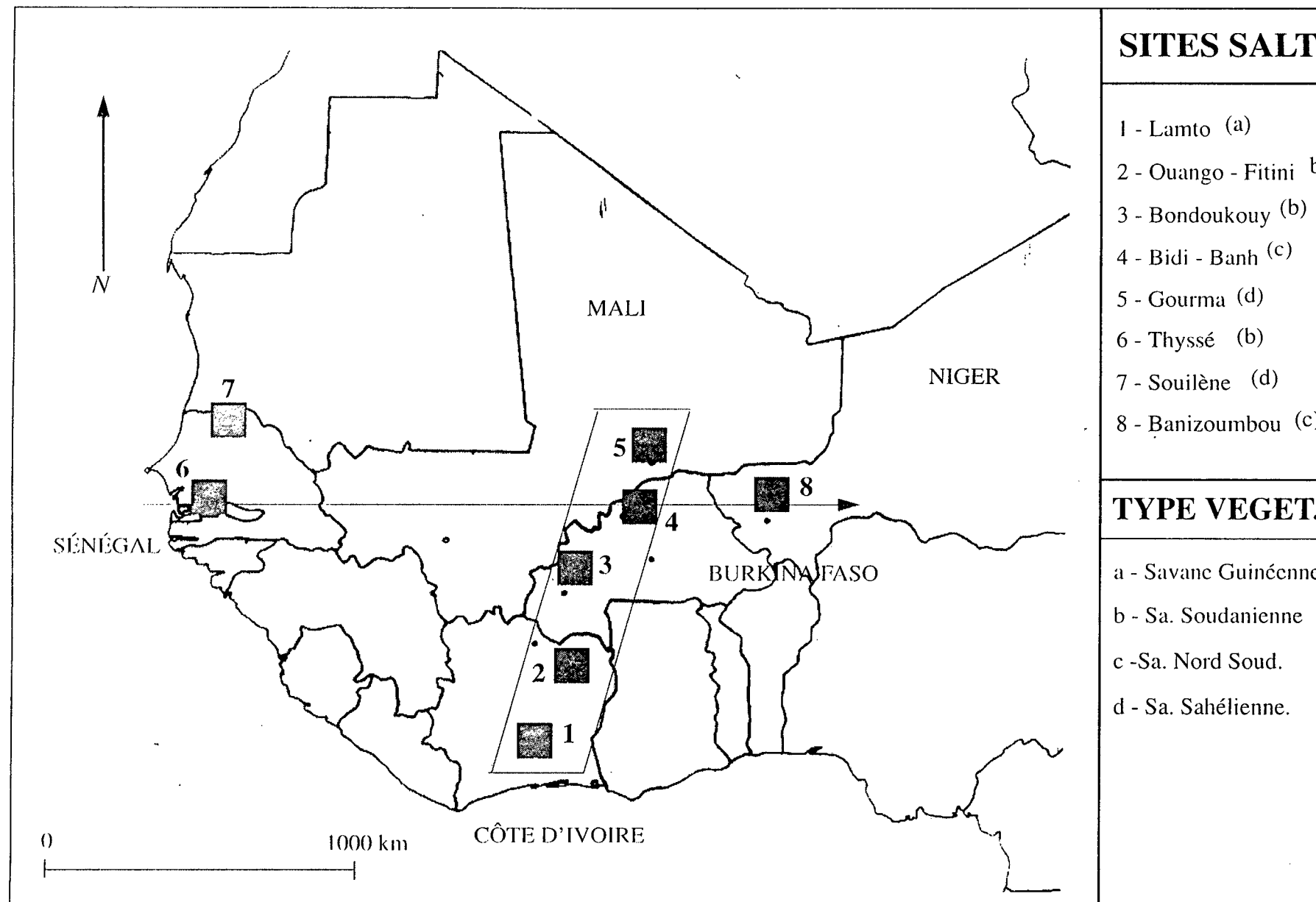


Figure 0-1 : Localisation des sites SALT en Afrique de l'ouest.

En fait, ce problème se pose en termes différents selon l'échelle d'observation. C'est la raison pour laquelle deux approches ont été explorées, à deux échelles très contrastées:

- d'une part, à l'échelle locale / régionale, sur un secteur représentatif de l'un des sites de contrôle du programme SALT (Bondoukouy, Burkina Faso). C'est à cette échelle que seront identifiés plusieurs types de savanes. Le choix du site de Bondoukouy répond à plusieurs exigences : relative homogénéité du milieu, saisons climatiques bien marquées, site bien documenté du fait d'un personnel ORSTOM permanent. A cette échelle, le rattachement des classes de comportement temporel AVHRR à pleine résolution spatiale (1 km), à des types définis de savane, sera réalisé à partir d'une analyse systématique des données SPOT et d'une confrontation aux données de terrain.

- d'autre part, à l'échelle continentale. Il s'agira ici de valider et d'étendre, à l'ensemble du continent africain, la méthode utilisée précédemment grâce aux données AVHRR à 15 km de résolution (format GVI)¹. Cette approche concernera tous les types d'écosystèmes présents sur le continent, mais les savanes d'Afrique de l'ouest feront l'objet d'un traitement particulier, à travers l'analyse des sites SALT.

La démarche d'ensemble est schématisée en figure 0-2. Les différentes étapes méthodologiques seront précisées dans les chapitres II et III.

1. cf Annexe A.

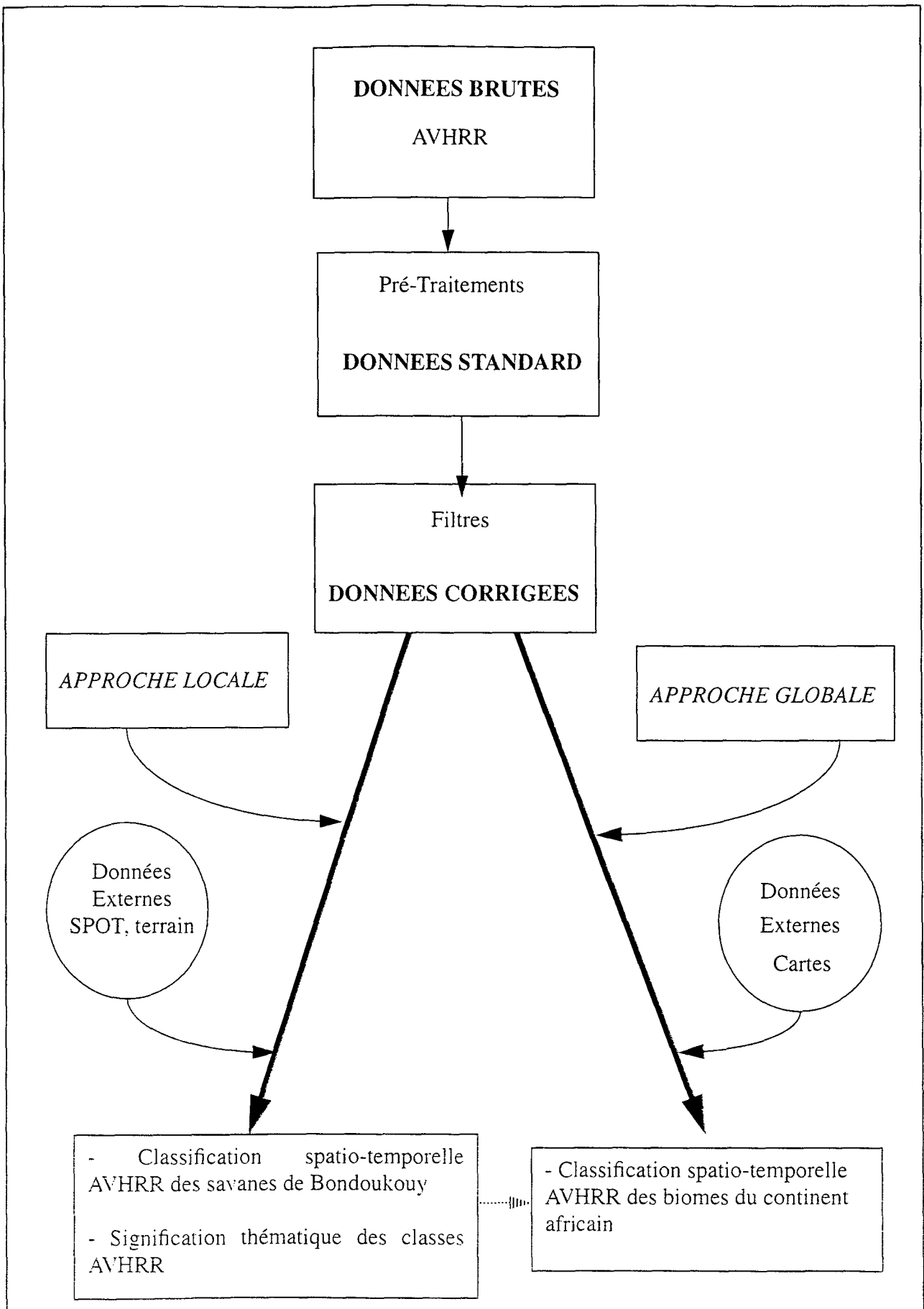


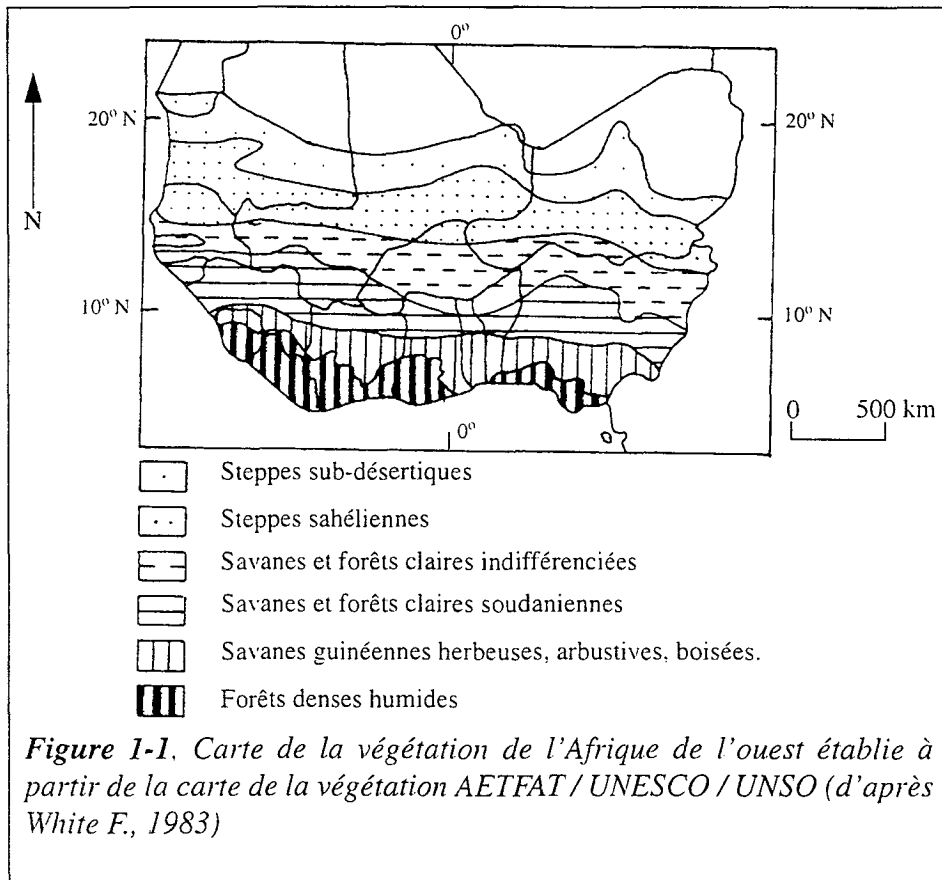
Figure 0-2, Schématisation de la démarche d'ensemble de l'étude.

CHAPITRE 1:

LE CADRE GEOGRAPHIQUE: savanes et forêts d'Afrique de l'Ouest

L'Afrique de l'ouest juxtapose un ensemble d'écosystèmes fort différents (Menaut J-C., 1983). Le long d'un gradient latitudinal et en fonction de la continentalité induite par la longitude, la végétation se répartit selon une mosaïque complexe. Ce phénomène exprime aussi bien l'hétérogénéité naturelle des milieux que la pression anthropique et pastorale exercée de longue date, et qui a fortement influencé la répartition de la végétation.

En Afrique de l'ouest, la végétation s'organise schématiquement en une série de bandes grossièrement parallèles (figure 1-1). Depuis la côte atlantique, bordée par la forêt dense



humide et aujourd'hui largement dégradée, se succèdent la savane dite "guinéenne", caractérisée par de fréquentes imbrications forestières, puis la savane soudanaise plus sèche, relayée au nord par la savane sahélienne jusqu'aux marges du désert saharien.

Cette organisation traduit d'abord l'existence d'un gradient pluviométrique nord-sud, entre la bordure méridionale aride du Sahara et le littoral abondamment arrosé du golfe de Guinée. Toutefois, il faut nuancer cette approche un peu trop réductrice dans la configuration actuelle des grands domaines biogéographiques de l'Afrique. D'une part, l'héritage

trappe
d'un
mousson
du
Soudan -

paléobotanique a joué un grand rôle (Schnell, 1976). D'autre part, la nature des roches et des sols, la configuration géomorphologique et le régime hydrique qui leur sont associés, contraignent également la répartition de la végétation. Enfin, les paysages africains portent depuis longtemps l'empreinte des actions humaines, en particulier en ce qui concerne la répartition savane / forêt. Ainsi, dans les espaces forestiers, le défrichement temporaire ou définitif crée de nombreuses clairières, et par endroit, laisse place à des savanes intra-forestières caractéristiques de la zone guinéenne, comme dans les forêts de Côte d'Ivoire du massif guinéen (Menaut J-C., 1992 ; Schnell R., 1976). Dans les savanes et les forêts sèches, la pression anthropique est encore plus forte et le milieu apparaît très profondément marqué par la présence des hommes. Seuls certains espaces situés à l'écart des grands axes restent plus ou moins protégés, comme le pays Lobi, situé entre Banfora et Ouango-Fitini (nord de la Côte d'Ivoire) où la persistance d'une belle futaie d'*Isorbelinia Doka* au sein d'un ensemble de savanes, illustre bien la structure "naturelle" des forêts sèches soudanaises. Dans les milieux à climat plus sec, la pression pastorale se fait davantage sentir, donnant parfois aux savanes nord-soudanaises et sahéliennes un faciès dégradé très marqué en fin de saison sèche. L'érosion due au ruissellement des premières pluies peut alors provoquer de nombreux dégâts sur la litière et les horizons organiques superficiels. Enfin, le feu joue un rôle crucial dans le développement et l'entretien des savanes. Celui-ci est principalement lié à l'utilisation des espaces pastoraux. Il permet en effet de nettoyer des parcelles où paîtront les animaux durant la saison des pluies. Ces feux de brousse, quoique individuellement localisés affectent en réalité d'immenses étendues de savanes (de 50% à 75% de la surface de savanes par an, selon J.C. Menaut).

1.1 - LES GRANDS TRAITS DU CLIMAT DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

Le climat de l'Afrique de l'ouest est déterminé par la convergence de deux grandes masses d'air :

- d'une part, l'alizé de direction nord-est / sud-ouest, issu du Sahara et alimenté par l'anticyclone de Lybie. C'est l'Harmattan, vent chaud et sec qui souffle en saison sèche.

- d'autre part, un flux de mousson de direction sud-ouest / nord-est, originaire de

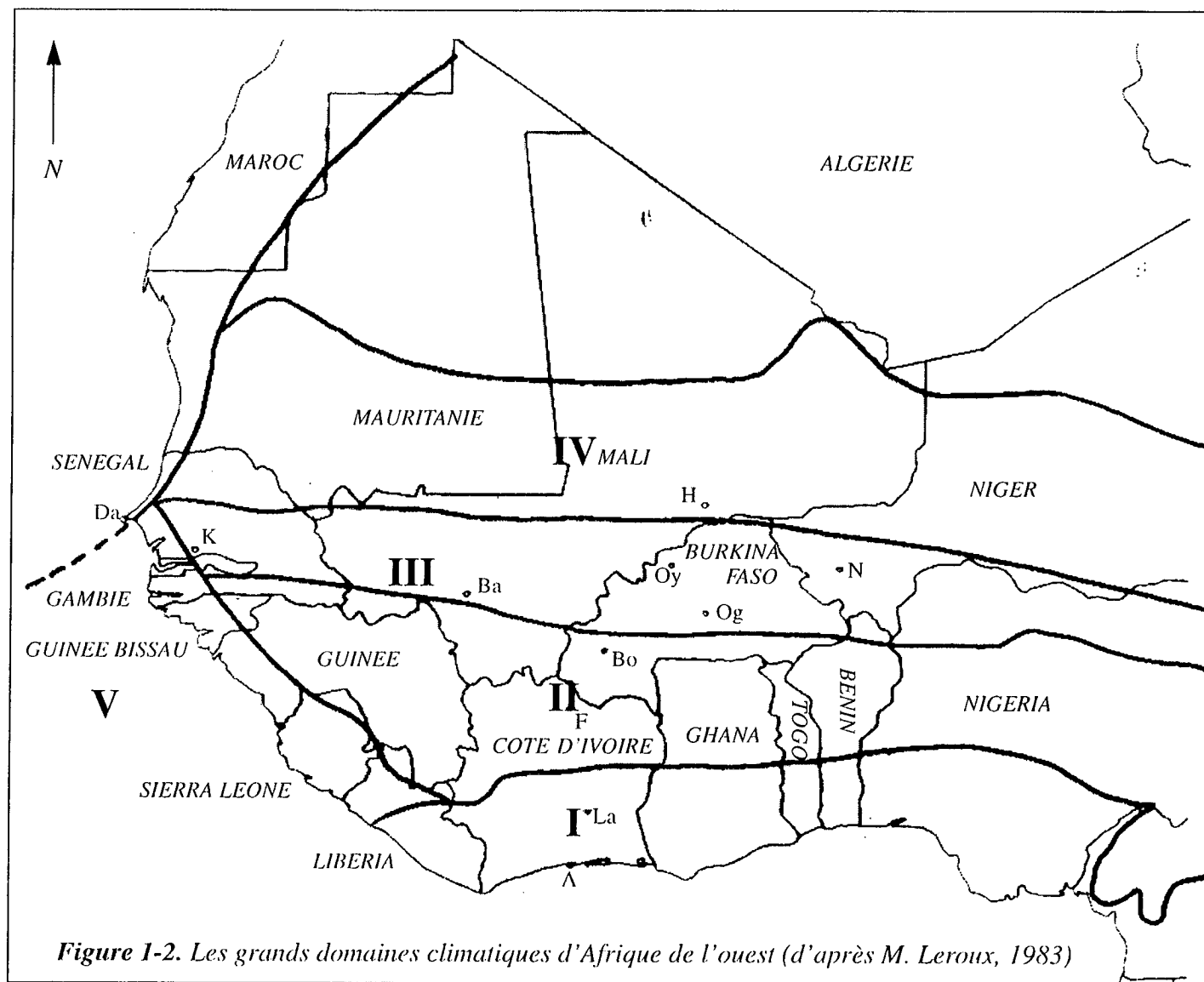
l'hémisphère sud et infléchi par la force de Coriolis à sa traversée de l'équateur. Ce flux de mousson transporte l'humidité océanique du golfe de Guinée jusqu'à l'intérieur du continent.

Ces deux grandes masses d'air se repoussent mutuellement au gré des alternances saisonnières, liées au mouvement apparent du Soleil et caractéristiques des régions intertropicales. La convergence, en elle même, est un phénomène majeur matérialisé par le Front de convergence Inter-Tropical (FIT), largement étudié par les météorologues et les climatologues. C'est la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT) qui détermine la saisonnalité en Afrique de l'Ouest. En effet, c'est le glissement en latitude du front qui est à l'origine du gradient pluviométrique décroissant. Cette ligne de front met environ six mois pour passer du golfe de Guinée à l'extrême nord de la savane, jusqu'aux portes du désert. Le reflux du front inter-tropical est nettement plus rapide puisqu'il ne dure que quatre mois (figure 1.2). L'atténuation pluviométrique le long d'un transect nord-sud est très sensible (tableau 1.1) mais l'onde de pluie décroît non seulement en fonction de la latitude mais également en fonction de la continentalité, du fait de la masse du continent africain. De ce fait

Tableau 1.1, Données climatiques de quelques stations d'Afrique de l'Ouest

Stations	P (mm) moy.	T (°C) moy.	Nb mois secs	Maximum de P	Saison des pluies	Type de climat
Abidjan (A)	2000	26	0 (P)	juin & août	Permanent	I
Lamto (La)	1300	26	2	août	Mar - Dec	I
Ferkessédougou (F)	1400	26	3	août	Mar-Nov.	II
Bobo-Dioulasso (Bo)	1100	26	4	août	Mar-Oct.	II
Ouagadougou (Og)	800	28	5	août	Avr-Oct.	III
Ouahigouya (Oy)	700	28	6	août	Mai-Oct.	III
Hombori (H)	500	30	7	août	Mai-Oct.	IV

la répartition de la végétation se fait selon un gradient à la fois latitudinal et continental. La température n'exerce qu'une influence relativement limitée sur cette répartition, et elle varie avec la saisonnalité de la convergence intertropicale, à l'origine du rythme des précipitations. Les grandes catégories de savanes de l'Afrique de l'ouest sont ainsi étroitement liés aux régimes de pluies qui caractérisent cette partie du continent.



1.2 - LE DOMAINE GUINEEN

1.2.1 - La forêt pluvieuse guinéo-congolaise et le domaine de mousson permanente (type climatique I)¹

Ce domaine correspond à l'implantation de la forêt dense, forêt maintenue en retour par des facteurs hygrométriques et thermiques favorables. Ces régions sont soumises aux flux maritimes permanents liés à l'activité du FIT et qui baignent essentiellement les zones du pourtour du golfe de Guinée. La hauteur de la lame d'eau précipitée varie entre 2000 mm au Libéria et au sud du Nigéria et 1500 mm en Côte d'Ivoire, au Ghana et au Togo. D'après M. Leroux (1983), la rupture de la bande zonale de fortes pluies qui s'observe du Togo à l'ouest du Nigéria, serait due à la présence du massif de l'Atakora ainsi qu'à l'emprise plus importante de l'Harmattan sur le secteur le plus septentrional de la côte ouest africaine. Dans le domaine de mousson permanente, le régime des pluies est bimodal et reste lié, à la fois à la structure du Front Inter-Tropical et au prolongement de l'Inversion de l'Alizé Austral.

Les forêts hygrophiles sempervirentes du sud de la zone d'étude se répartissent sur le massif guinéen du sud du Ghana à la Côte d'Ivoire, sur le nord de la Guinée, sur le Libéria et sur une partie du Sierra Leone. Ces forêts hygrophiles typiques présentent une canopée pouvant atteindre 40 m. et en général une seconde strate forestière se situant à 20/25 m du sol. La strate herbacée est pratiquement inexistante au sein de ces formations. Parmi les espèces représentatives de la forêt dense tropicale de l'Afrique de l'Ouest, citons notamment *Lophira alata*, *Uapaca Guineensis*, *Turraeanthus africana*, *Bombax buonopozense*, *Khaya grandifolia* et *Ceiba pentandra*. Sur les hauts plateaux du Fouta Djallon (Guinée) et les hauteurs du mont Nimba (frontière guinéo-ivoirienne), la nébulosité induite par le relief génère des faciès forestiers de type "nebelwald" où abondent les bryophytes, les fougères et les épiphytes. La forêt tropicale humide guinéo-congolaise a subi des dégradations très importantes. En effet, les cultures itinérantes ont progressivement laissé place aux cultures sédentaires couvrant des espaces de plus en plus vastes. La structure de la forêt secondaire (Figure 1-3), qui succède généralement à l'abandon des espaces agricoles, correspond en grande majorité à une

1. Type climatique I de la figure 1.2.

formation de brousse surmontée par des houppiers de palmiers à huile.



Figure 1-3 : Un aspect de la forêt pluvieuse guinéo-congolaise secondaire en Côte d'Ivoire entre Abidjan et Lamto. Ce secteur de défrichement agricole est déjà recolonisé par une végétation secondaire dominée par les houppiers de quelques grands arbres.

Des formations hygrophiles se rencontrent également plus vers le nord, associées aux savanes guinéennes nées de la déforestation et de l'activité agricole et pastorale. Cette frange forestière nord se présente le plus souvent sous forme de galeries forestières associées aux cours d'eau et se caractérise également par un appauvrissement floristique sensible par rapport aux grands massifs méridionaux. Parmi les essences arborées rencontrées ici se distinguent *Allophylus africanus* et *Azizelia africana*.

Vers le nord, la forêt sempervirente passe peu à peu à une forêt semi-décidue mais ses limites sont floues, au gré des bas-fonds et des interfluviaux. Dans ces conditions, les limites forêts / savanes ne sont pas toujours faciles à déterminer. Au demeurant, c'est ce type de forêt semi-décidue qui se trouve toujours au contact des premières savanes. Nous pouvons citer l'exemple bien connu du "V" baoulé, sorte d'avancée en coin de la savane "pluvieuse", fiché

dans la forêt dense ivoirienne. Les lisières sont-elles d'origine naturelle ou anthropique? La dynamique actuelle est-elle forestière ou savanicole? Autant de questions qui restent en suspend dans l'étude de la limite septentrionale de la forêt dense.

1.2.2 - La savane guinéenne ou le contact forêt-savane (type climatique I)¹

Sont regroupés sous ce terme les écosystèmes de savanes situés dans la zone correspondant au domaine climatique guinéo-congolais. Deux ensembles de savanes se distinguent :

- d'une part, les savanes guinéennes dispersées dans la forêt et sur la côte,
- d'autre part, les savanes guinéennes regroupées au nord du massif forestier, dans une bande nord / sud large de 200 à 400 km environ. La savane guinéenne reçoit de 1000 à 1800 mm de pluie et subit 2 mois de saison sèche .

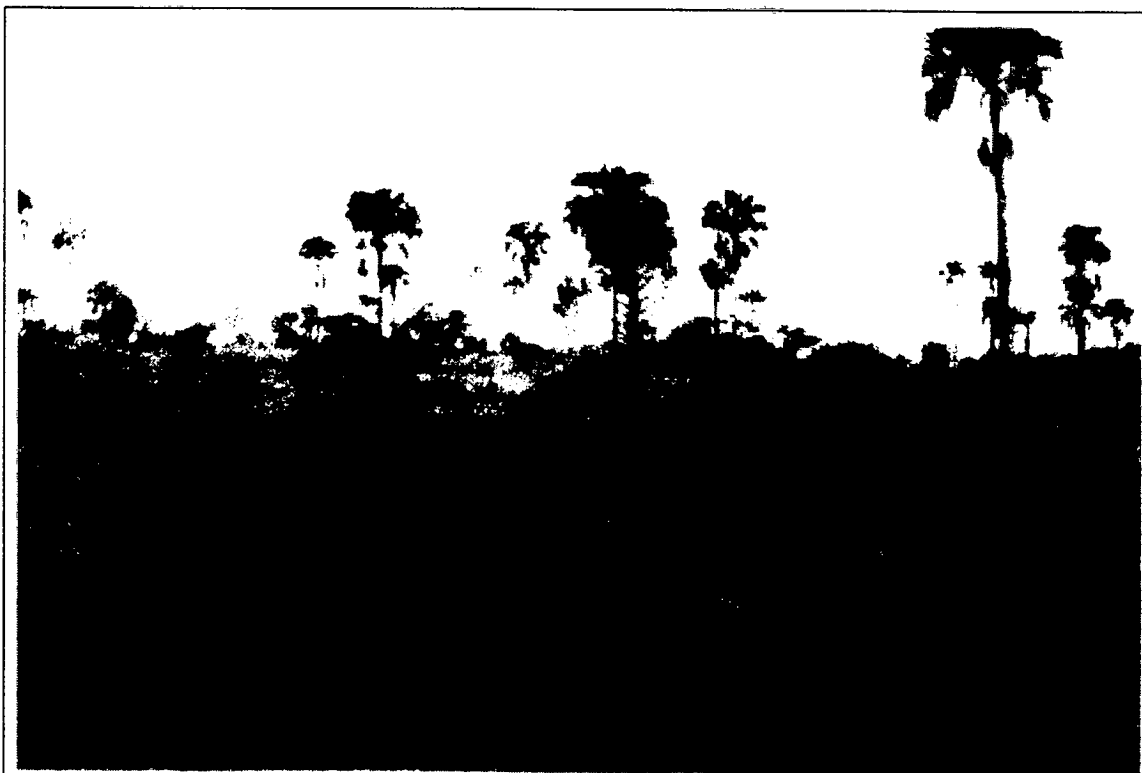


Figure I-4 : La savane à Rôniers au sein de la station écologique de Lamto en Côte d'Ivoire en début de saison sèche. Cette formation est essentiellement entretenue par des feux réguliers annuels.

1. type climatique I de la figure 1.2.

La formation typique de ces milieux peut être observée sur le site de Lamto (6°00 nord, 5°17' ouest). Le faciès le plus répandu est celui d'une strate herbacée très couvrante, surmontée de grands rôniers (*Borassus aethiopum*) de 20 à 25 mètres de haut (Figure 1-4). La limite entre ces savanes et la forêt dense est mal définie. C'est une imbrication de milieux diversifiés, où l'on rencontre des arbres forestiers, des arbres caractéristiques de la savane et surtout des herbacées (notamment les graminées *Panicum phragmitoides*, *Loudetia simplex* et *Loudetia arundinacea*). Du sud au nord de la bande définie par les savanes guinéennes, le gradient d'imbrication forestière décroît. S'ajoutent à cela les innombrables cours d'eau de cette région, bordés de forêts galeries denses dans lesquelles se retrouvent, même très au nord, des espèces forestières tel le fromager (*Ceiba pentandra*). Certains secteurs de savanes peuvent être par ailleurs assimilés à de véritables forêts claires composées d'*Isorbelinia*, *Monotes* et *Uapaca*. Il s'agit ici de formations d'origine essentiellement anthropique, le feu jouant ici un rôle déterminant dans l'entretien de la savane. Un relâchement de cette pression anthropique conduirait probablement à une reconquête forestière, comme l'indiquent certaines observations sur la colonisation des savanes par les espèces de forêt (Keay R., 1960) ou la composition isotopique de l'humus du sol (Guillet B., et al., 1994).

Compte tenu des nombreuses interpénétrations des différents milieux, on peut considérer la mince bande de savane guinéenne comme une zone de contact et de transition entre la forêt semi-décidue au sud et la savane soudanienne proprement dite, au nord.

1.3 - LE DOMAINE SOUDANIEN

La savane couramment dénommée soudanienne regroupe en fait de nombreux types de formations aux entremêlements très marqués. Se distinguent trois formations principales :

- les forêts claires soudaniennes,
- les savanes sud-soudaniennes,
- les savanes nord-soudaniennes.

1.3.1 - les forêts claires soudaniennes et le domaine sud-soudanien (type climatique II)¹

Au nord de la région affectée de façon quasi permanente par la mousson, cette zone qui reçoit plus de 1000 mm de pluie par an, correspond à l'espace englobant le nord de la Côte d'Ivoire et tout le sud du Burkina Faso depuis le sud du Sénégal à l'ouest jusqu'au centre du Nigéria à l'est. Deux massifs montagneux s'individualisent au sein de ce domaine. D'une part, le Fouta-Djalon (Guinée-Mali-Côte d'Ivoire) à l'ouest, où l'opposition des versants se caractérise par des précipitations de l'ordre de 2000 mm sur le versant occidental et 1500 mm sur le versant oriental. D'autre part, les plateaux de Jos et de Bauchi (Nigéria) à l'est qui, malgré la précoce invasion de l'Harmattan, reçoivent 1000 à 1500 mm de pluie par an.

Dans ce domaine climatique où la saison sèche dure entre 3 et 5 mois, les milieux sont souvent très contrastés et soumis à une pression anthropique importante. Ici les forêts claires sont constituées principalement d'*Anogeissus*, d'*Albizia*, de *Parkia*, d'*Isolberlinia*, de *Daniellia*, de *Terminalia* et de *Uapaca*. Leur structure originelle est homogène, la voûte s'élève à 10-15 mètres et laisse passer suffisamment de lumière pour que se développe une strate herbacée importante, qui la rattache au domaine savanicole. C'est le cas notamment des grands glacis du sud du Burkina-Faso où s'étendent des forêts plus ou moins claires dont l'espèce arborée typique est *Isorbelinia Doka*. Cette espèce ne forme d'ailleurs pas de peuplement pur, mais constitue un repère commode. En effet la richesse floristique de ces formations sur glacis permet de lui associer, à peu près partout, les espèces *Daniellia Olivieri*, *Vitellaria paradoxa* (Karité) et *Monotes kerstingii*.

C'est dans cette région que l'on observe également les belles forêts claires du pays Lobi, encore peu défrichées, au nord du parc national de la Comoé (site de Ouango-Fitini, nord de la Côte d'Ivoire). Ce type de forêts est à mettre en correspondance avec le climat propre à ces latitudes (White F., 1983). Toutefois la forte dégradation provoquée par l'homme ne laisse que des lambeaux épars de cette formation originelle. Très dégradées et fragmentées, ces forêts constituent néanmoins une ressource importante et peuvent localement être exploitées comme nous avons pu le constater au Burkina-Faso.

1. Type climatique II de la figure 1.2.

1.3.2 - les savanes soudaniennes (type climatique II)¹

Dès que la canopée des forêts claires décrites ci-dessus n'est plus jointive, on passe aux savanes de type soudanien (figure 1-5) comme celles observées au nord des falaises de Banfora (Sud du Burkina-Faso). Souvent exploitées pour l'agriculture et l'élevage, ces savanes sont soumises également à l'action des feux. Elles occupent le sud du Sénégal, le sud du Mali, le sud du Burkina-Faso, le nord du Ghana et le nord du Nigéria. Les précipitations y varient de 500 à 1500 mm avec une gamme de saisons sèches durant de 4 à 6 mois. Ces régions sont largement soumises à l'Harmattan. La mosaïque de savanes est extrêmement diversifiée dans ces milieux, depuis les bas-fonds dont l'aspect évoque les savanes guinéennes jusqu'aux cultures de canne à sucre, de mil ou de sorgho, en passant par de vastes Bowés couverts de *Loudetia* et d'*Aristida* (à l'image des formations herbeuses plus septentrionales). Dans certaines régions à forte densité démographique, les savanes largement cultivées

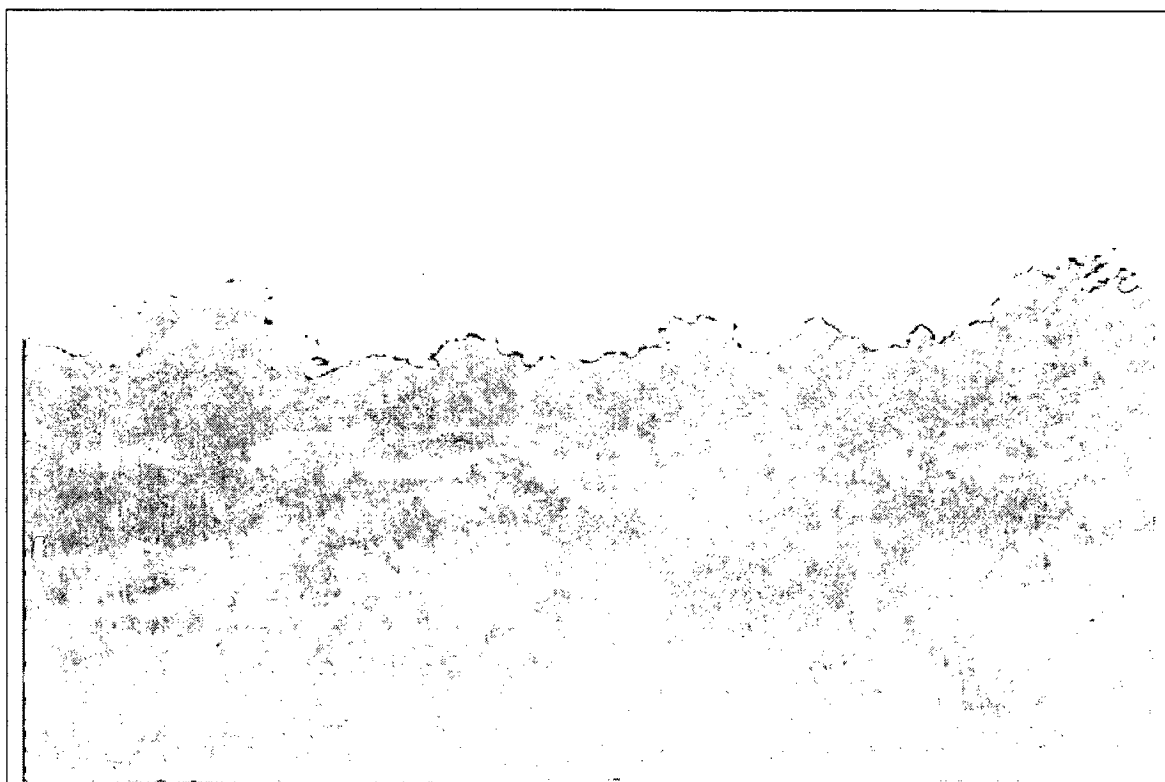


Figure 1-5 : La savane soudanienne au sud du Burkina Faso . La strate herbacée, ici de faible hauteur, est dominée par un couvert ligneux plus ou moins dense et complexe. Le sol nu apparaît par endroits. En domaine agricole ces savanes deviennent des savanes-parcs (la strate herbacée est remplacée par les cultures).

1. Type climatique II de la figure 1.2.

conservent cependant une proportion notable d'essences forestières, comme c'est le cas par exemple, des savanes-parcs du site de Bondoukouy (Burkina-Faso).

1.3.3 - la savane nord soudanienne (type climatique III)¹

Avec une lame d'eau comprise entre 500 et 1000 mm de pluie par an et une saison sèche de sept à huit mois, cette zone offre un aspect encore relativement humide... Toutefois, lors de



Figure 1-6 : Aspect de la savane nord soudanienne. Aux environs du site de Bidi-Bahn au Burkina Faso, les Baobabs parsèment une savane nettement moins ligneuse que les savanes soudanienues. La strate herbacée laisse de plus en plus la place au sol nu.

l'invasion de l'Harmattan, la sécheresse provoquée par la forte évapotranspiration donne déjà au paysage l'aspect d'une savane xérophytique. La variabilité interannuelle devient un trait majeur de ce domaine : en effet la ZCIT remonte jusqu'à la limite méridionale nord-soudanienne, laissant ainsi ces régions hors de son rayon d'action. Les pluies tombent souvent sous forme d'orages et de lignes de grains violents. Au nord de Ouagadougou, la sécheresse

1. Type climatique III de la figure 1.2.

des milieux s'affirme nettement (précipitations inférieures à 800 mm)

Ces savanes de type nord soudanien présentent des caractéristiques floristiques fort différentes des savanes sud-soudaniennes. Ainsi *Isoberlinia Doka* et les espèces qui l'accompagnent sont moins fréquents, au point de ne plus former des peuplements denses mais plutôt des îlots au gré des bas-fonds et des zones de drainage. Des arbres comme le Baobab (*Adansonia digitata*) font en revanche une apparition remarquée dans le paysage (Figure 1-6). Des espèces comme les *Acacia Seyal* et *Acacia Albida* sont plus largement répandues, accompagnées de *Combretum Glusinosum*, de *Terminalia*, de *Guiera senegalensis*, de *Pilogstigma reticulata* etc. Parallèlement, l'utilisation agro-pastorale du sol fait une place plus large à l'élevage et aux cultures semi-extensives.

La transition entre les savanes soudaniennes et les steppes sahéliennes ne permet pas de fixer de limite nette entre les deux domaines. Au Burkina Faso, elle peut toutefois se situer vers 13° de latitude nord, aux environs de Yako. La couverture herbacée est de plus en plus clairsemée, les plantes à caractère épineux se rencontrent plus fréquemment. Les formations sont ouvertes, et moins sensibles au feu (site de Bidi-Banh). Différentes adaptations de la végétation aux conditions naturelles donnent des associations originales, comme pour la brousse tigrée, localisée préférentiellement sur les surfaces cuirassées recouvrant les plateaux.

1.4 - LE DOMAINE SAHELIN

1.4.1 - La steppe sahélienne (type climatique IV)¹

Avec seulement 250 à 500 mm de pluie et plus de six mois de saison sèche, le Sahel se distingue nettement des zones guinéennes et soudaniennes. D'une part, il s'agit d'un domaine sans relief majeur, exception faite du massif de Bandiagara et des monts Hombori au Mali. D'autre part, la végétation de steppe constitue sa caractéristique essentielle : strate herbacée basse, buissons bas et épineux plus denses, arbres rares. L'évapotranspiration atteint des niveaux très élevés et joue un rôle crucial dans l'adaptation de la végétation steppique. La

1. type climatique IV de la figure 1.2.

saison des pluies est extrêmement courte. Les sécheresses intenses et durables affectent régulièrement ces régions. Cependant, les faciès végétaux présentent une variabilité importante. Ainsi, à l'extrême nord du Burkina Faso s'étend une zone de transition entre la brousse tigrée sur socle granitique et les formations sahéliennes recouvrant les grès et les sables du Seno-mango. Cette région assure le passage entre les savanes nord-soudaniennes et les steppes sahéliennes du Mali (site de Hombori). Les conditions climatiques y sont sévères

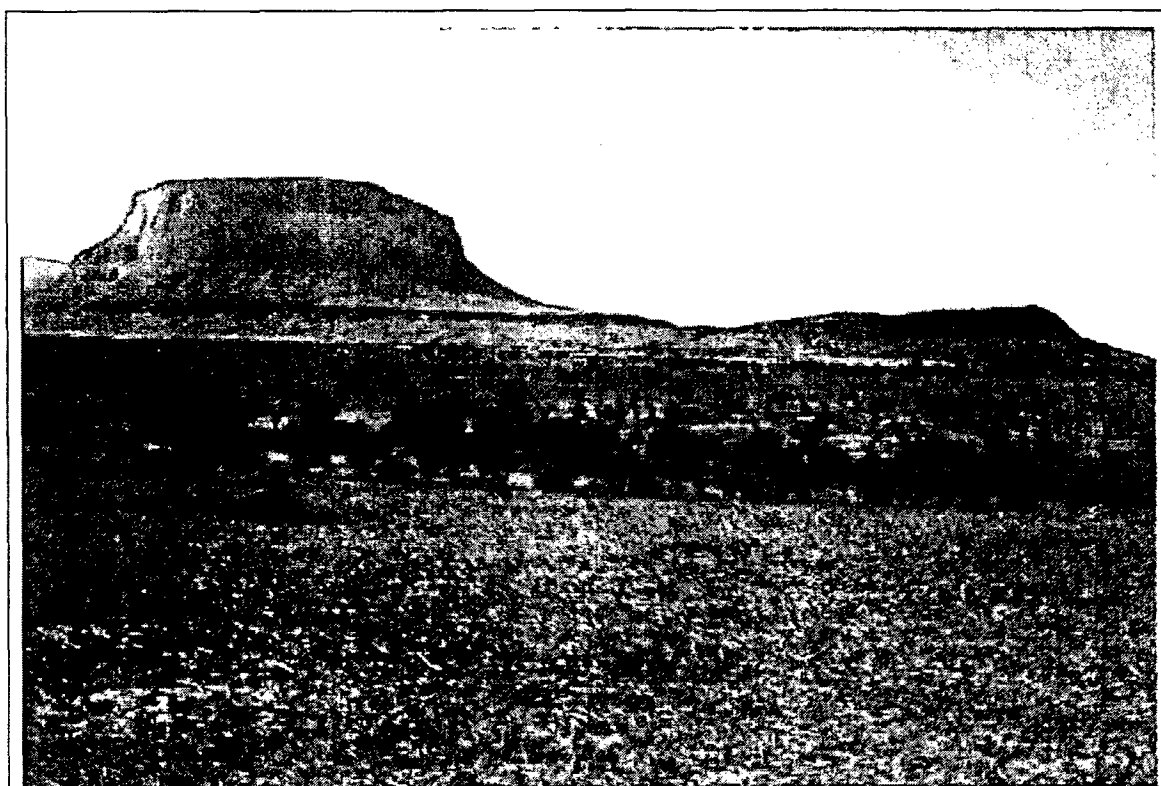


Figure 1-7 : Steppe sahélienne à l'est du Mont Hombori (1115 m). La prise de vue date de novembre 1992, la saison sèche est bien entamée. La strate herbacée est largement broutée par les bovins. Le feu est peu utilisé dans ces milieux, ce sont les animaux domestiques et les aléas climatiques qui cisèlent le paysage.

avec des précipitations moyennes oscillant entre 250 et 500 mm par an, et une saison sèche pouvant atteindre 7 mois. Au Mali en revanche, on observe de vastes systèmes dunaires orientés ouest-est, couverts non pas d'une steppe mais d'une véritable savane herbeuse dense parsemée d'arbres. Leur composition floristique est dominée par les *Acacias*, *Cynchrus*, *Loudetia* et *Aristida* ainsi que par les espèces caractéristiques des steppes épineuses. Au-delà des falaises de Bandiagara, en direction des monts Hombori, on retrouve les steppes sahéliennes proprement dites. La composition floristique de ces formations steppiques est dominée par *Acacia Seyal*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia Senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*

pour les ligneux, *Aristida mutabilis*, *Cenchrus biflorus*, *Schoenefeldia gracilis* et *Panicum turgidum* pour les principales herbacées. Dans les bas-fonds se développent également des formations à *Acacia nilotica* et *Oryza barthii*.

Toutes ces régions se sont aussi rendues tristement célèbres lors de la famine de 1984. Aujourd'hui, les espaces agricoles et pastoraux sont redevenus relativement verdoyants avec un cheptel bovin restauré grâce à plusieurs saisons des pluies abondantes (Figure 1-7). Les activités des populations locales principalement pastorales, entretiennent une pression importante sur ces milieux.

1.4.2 - le domaine péri-désertique

Au nord d'une ligne située vers 15° de latitude nord (au-delà de la mare de Gossi au Mali) commence le domaine péri-désertique. Caractérisés par de vastes étendues à dominante minérale et à végétation très rase et très éparse, ces systèmes font transition aux milieux purement désertiques du Sahara, au-delà de la boucle du Niger. Les précipitations y sont inférieures à 250 mm par an. La végétation xérophile et rase ne supporte qu'une très faible pression pastorale. Les pâturages sont pauvres et ne peuvent subvenir aux besoins du bétail, limité également par la rareté de l'eau. Ces espaces sont les lieux de rencontres commerciales entre les nomades Touaregs venus du nord et les habitants sédentaires.

Classification naturaliste

↳ exclude vegetation agricole

change 2 in dist. zone have

— *Zone Purpurea*

diversus-vegetation⁹.

~~pas de~~
type de classification ^{à l'unité}

pas d'apogée et le docteur

regerⁿ à l'aveugle et l'aveugle révolution

Au moins des hypothèses !

C'est donc de un / deux de ces

C'est dans un lieu de ces
- des pas de refuge - ni pas de terre dans de ardeur géo.
loux

↳ chargée d'échelle ~ faire l'ongle pour

un minimum de respect sur l'approche "pro actif".

CHAPITRE 2 :

APPROCHE LOCALE : identification des savanes de Bondoukou à partir des données AVHRR

2.1 OBJECTIFS

Les images de télédétection à basse résolution spatiale, comme celles de NOAA-AVHRR à 1 km, fournissent des représentations globales de la surface terrestre, comme l'ont montré de nombreux travaux (Goward N., *et al.*, 1985 ; Vogt J., 1992 ; Belward A., 1995 ; Cilhar J., 1995). Elles ne permettent cependant pas, en règle générale, d'obtenir une identification satisfaisante des différents types de couverture végétale, à l'intérieur même d'un grand biome (Achard F., 1990, Laporte N., 1990, Malingreau J-P., 1986, Aman A., 1991). De même, les faciès structuraux de savanes appartenant à un même grand domaine bioclimatique, "homogène" à l'échelle zonale, sont souvent difficiles à identifier et à distinguer (Defourny P., 1992 ; Goutorbe J-P., *et al.*, 1994).

L'objectif central de cette analyse à l'échelle locale du site de Bondoukou est de mettre en oeuvre une approche multitemporelle qui permette à la fois :

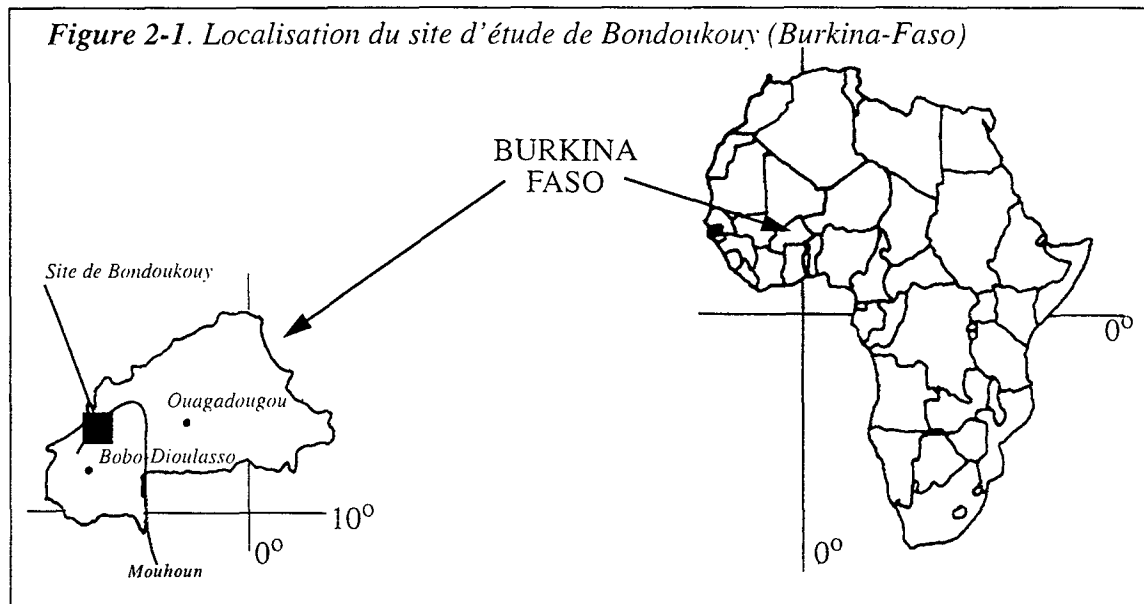
- de caractériser l'évolution temporelle des surfaces à partir de la variation du signal AVHRR, afin d'établir une classification des pixels sur le critère de leur comportement temporel (qui exprime la phénologie des surfaces observées).
- de chercher à établir les relations qui existent entre cette classification et les principaux faciès structuraux de savane du site de Bondoukou.

Nous avons donc développé une méthode permettant de caractériser le contenu, en terme de pourcentage d'homogénéité / hétérogénéité, du "pixel temporel" AVHRR. De ce comportement temporel, nous avons déduit les faciès structuraux de savanes, après l'analyse comparative avec des données à meilleure résolution spatiale (SPOT-HRV) et des données de terrain. Les différentes étapes méthodologiques sont décrites dans les paragraphes 2.3 et 2.4.

2.2 - CARACTERISATION GENERALE DU SITE DE BONDOUKOUY

2.2.1 Localisation générale

La zone d'étude de Bondoukouy (du nom du village installé sur la route qui relie Dédougou et Bobo-Dioulasso) se localise dans l'ouest du Burkina-Faso entre $11^{\circ}30'$ et $12^{\circ}30'$ de latitude nord et $3^{\circ}30'$ et $4^{\circ}30'$ de longitude ouest (Figure 2-1). Le site étudié occupe la partie amont du cours du fleuve Mouhoun. Celui-ci prend sa source sur le versant nord des falaises de Banfora (750 mètres d'altitude) et coule du sud vers le nord dans une large vallée. Il recoupe la fenêtre d'étude selon une direction sud-ouest / nord-est.



2.2.2 Repérage cartographique

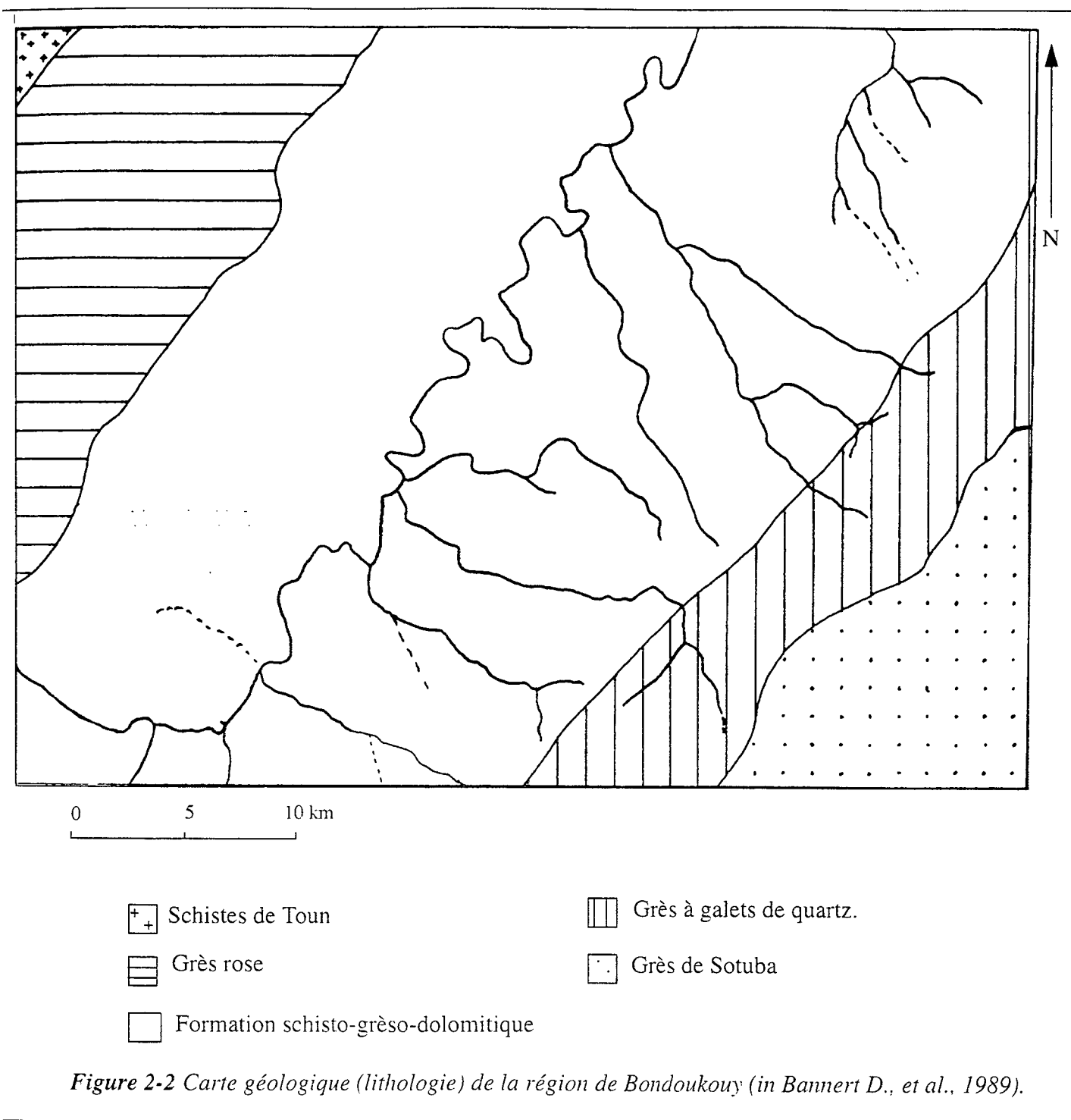
L'espace d'observation est constitué par une fenêtre de 50 km en longitude et 40 km en latitude, à l'intérieur de la zone d'étude de Bondoukouy précédemment définie. Pour ce chapitre, tous les plans cartographiques présentés sont superposables, de façon à tester l'influence d'éventuelles structures paysagères sur la distribution des pixels (cf paragraphe 2.5).

2.2.3 Aperçus géologique, géomorphologique et pédologique

- La structure géologique de la région est organisée en larges bandes parallèles, d'âge infracambrien, et orientées sud-ouest / nord-est (Jöns H., in Bannert D., *et al.*, 1989). Sur la carte géologique (Figure 2-2), la partie centrale de la zone est occupée par des matériaux schistogréseux et dolomitiques. Ce large soubassement est encadré, à l'ouest, par des grès roses et des schistes et, à l'est, par des grès à galets de quartz puis des grès purs.

- Le dispositif géomorphologique d'ensemble est simple. Il s'agit essentiellement d'un domaine de socle vigoureusement aplani par l'érosion se présentant sous la forme d'une immense pédiplaine. Le Mouhoun coule au centre d'une large dépression faiblement marquée, orientée sud-ouest / nord-est, et taillée dans des formations schistogréseuses plus tendres. Au nord-ouest et au sud-est, cette dépression est bordée par une série de plateaux gréseux, dominant la plaine de quelques dizaines de mètres. Seule une partie du plateau du sud-est est comprise dans la fenêtre de Bondoukou. Le contact entre la plaine centrale et les plateaux gréseux, relativement doux et progressif à l'ouest (mais hors fenêtre), est marqué par une bordure sensiblement plus escarpée à l'est. Large d'environ 100 m à un kilomètre, avec un commandement de 10 à 50 m, cette bordure est très irrégulièrement démantelée et disséquée par les affluents du Mouhoun. Quelques buttes témoins, que l'on peut parfois retrouver loin dans la dépression centrale, accompagnent ce rebord démantelé.

- La distribution des sols du site de Bondoukou ne reflète pas très clairement la configuration géologique. La carte pédologique (Hoffman R., in Bannert D., *et al.*, 1989) (Figure 2-3) ne montre guère d'influence marquée de la lithologie sur la couverture des sols. Seule la bande des sols alluviaux à tendance hydromorphe qui s'allonge de part et d'autre du fleuve Mouhoun se distingue clairement, contrairement aux plateaux, où la configuration pédologique est plus complexe. Cependant, ces données pédologiques doivent être analysées avec précaution, dans la mesure où elles sont le résultat d'une extrapolation d'un document à très petite échelle. Par ailleurs, elles ne sont pas très cohérentes avec les données qui accompagnent l'interprétation de la classification des images SPOT, comme on le verra ci-



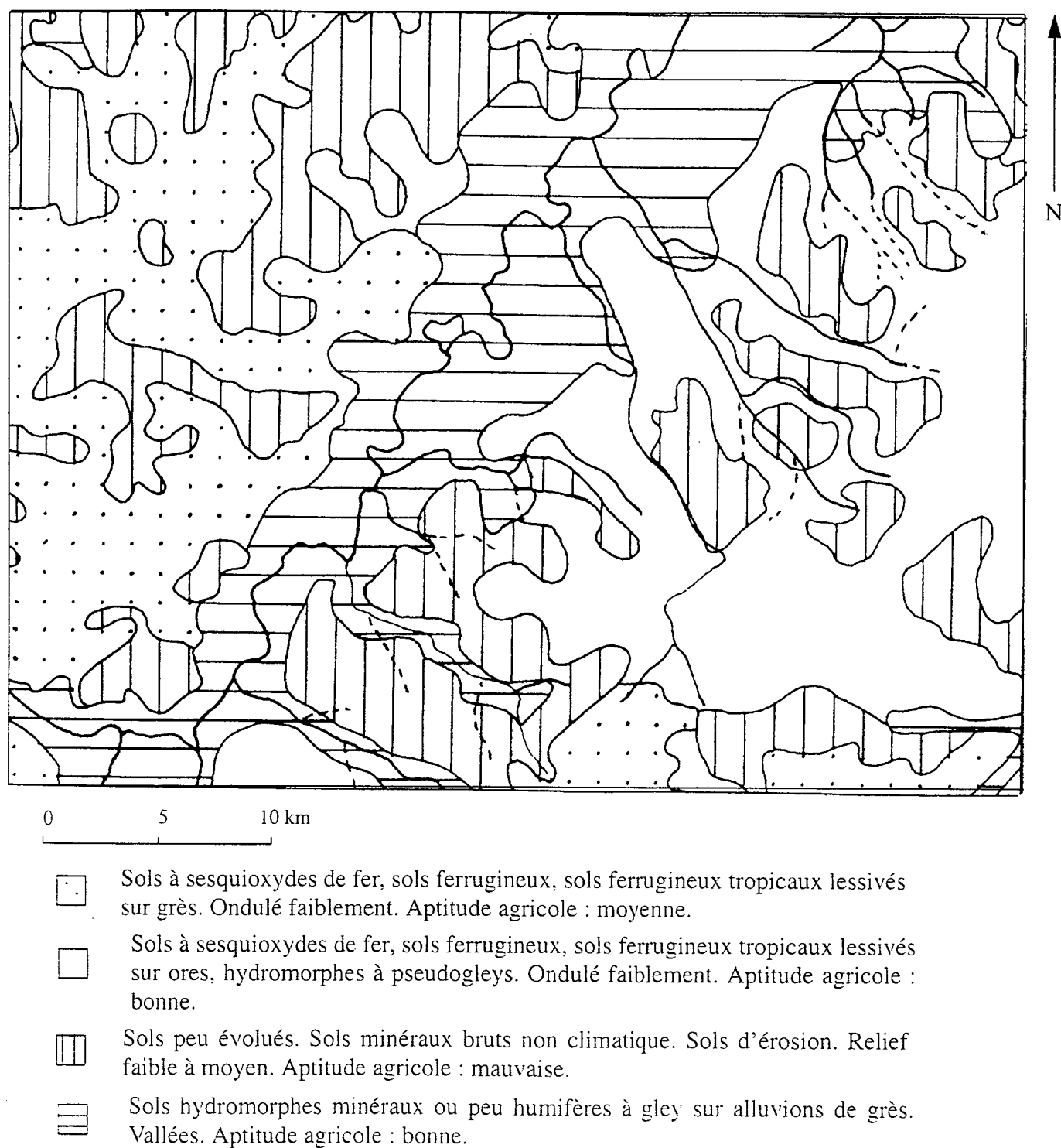
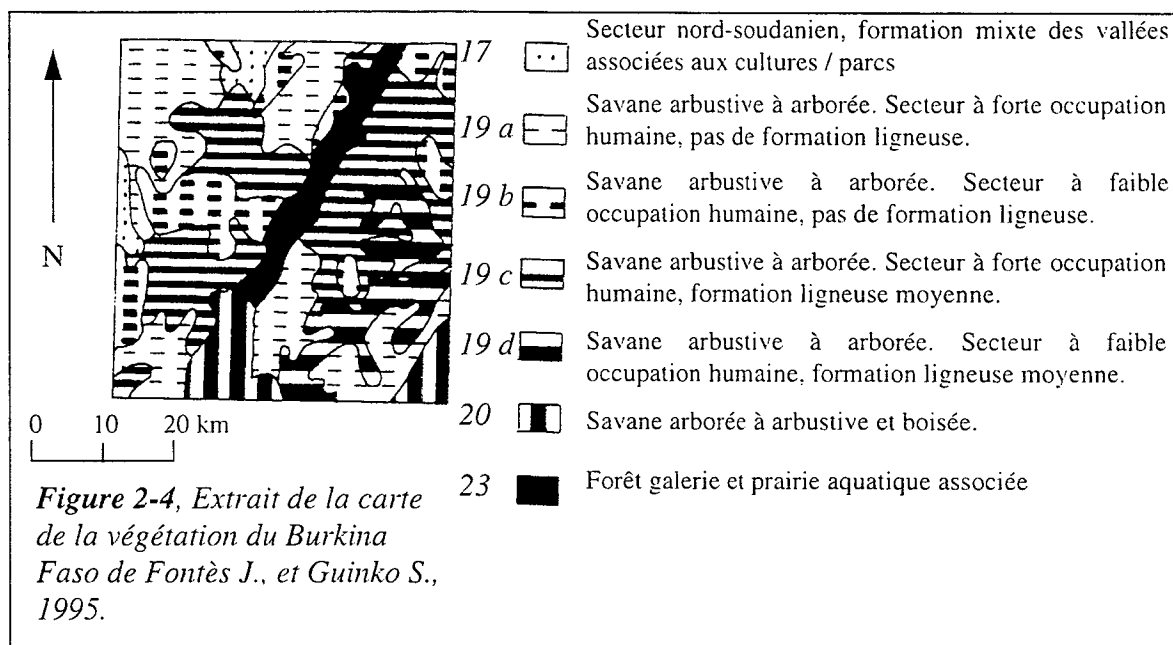


Figure 2-3 Carte pédologique de la région de Bondoukou (in Bannert D., et al., 1989).

dessous.

2.2.4 Les grands traits du paysage et de l'exploitation humaine de Bondoukou

2.2.4.1 Trois ensembles majeurs se partagent l'espace du site de Bondoukou (Figure 2-4)



- les paysages de savanes-parcs qui occupent la plus grande partie de l'image, de part et d'autre du Mouhoun dans la dépression centrale (classes 17, 19a, 19b et 19c, Figure 2-4). Il s'agit d'une savane soudanienne où la strate herbacée a été largement remplacée par les cultures (ici le mil et le coton). Une strate arborée lâche subsiste cependant sous forme d'arbres isolés bien développés (nééré, karité notamment).

- le couloir alluvial du Mouhoun, milieu au sol presque constamment humide (classe 23 de la Figure 2-4). C'est un ensemble complexe dominé par des savanes herbeuses à hautes herbes avec quelques îlots forestiers et une forêt galerie quasi continue en bordure du fleuve. C'est essentiellement une zone d'élevage bovin, côtoyant quelques parcelles de cultures vivrières (riz).

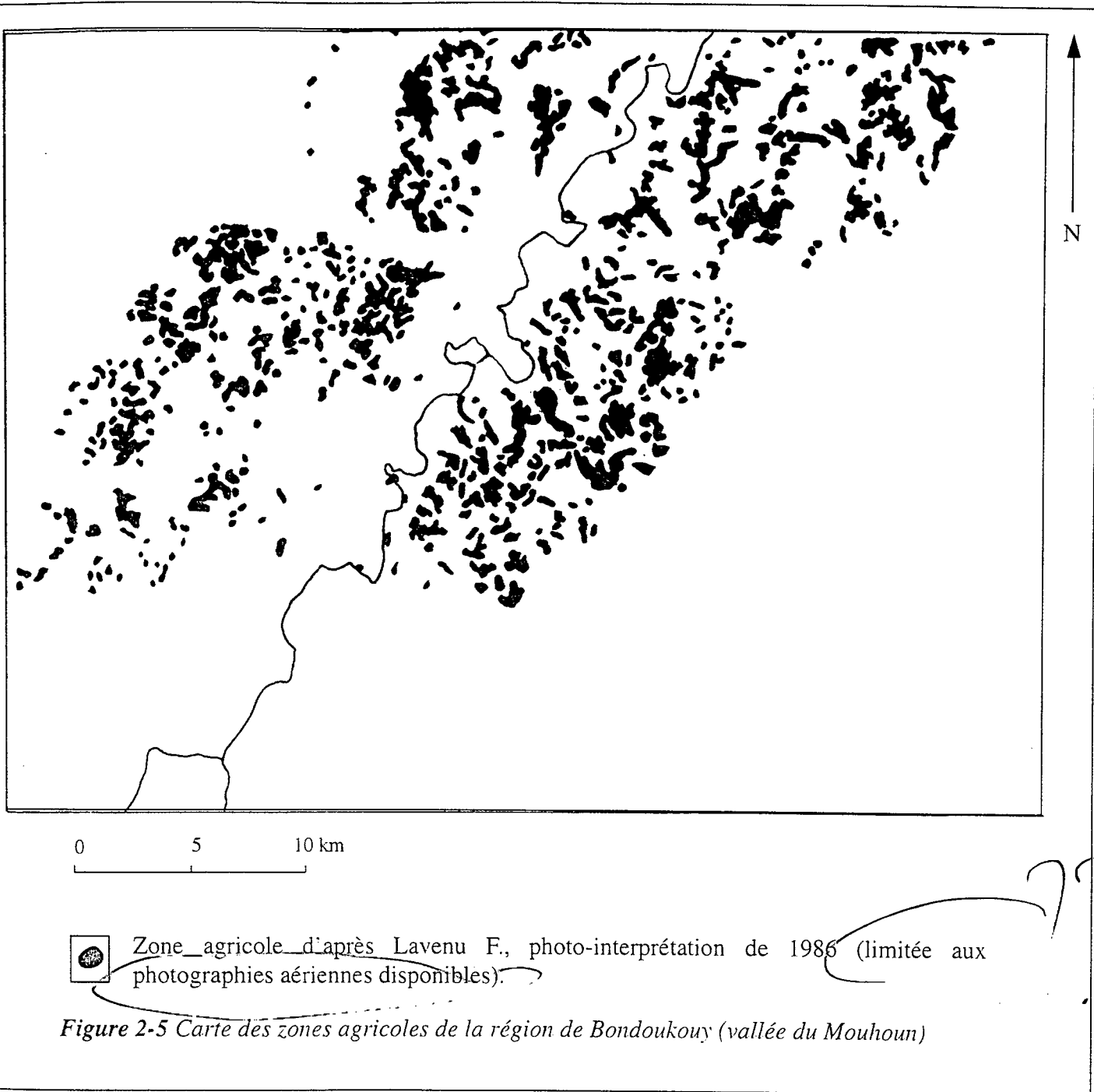
- la savane boisée du plateau du sud-est, avec un couvert arboré dense, fait une sorte de transition vers la forêt sèche, où dominent *Isobertia Doka* et *Daniella Olivieri* (classes 19d et 20 de la Figure 2-4). Cette savane boisée tend à déborder largement du plateau, sur la bordure démantelée qui fait elle-même transition avec la dépression centrale (cf paragraphe 2.2.3).

2.2.4.2 L'impact anthropique

La région de Bondoukou est très marquée par les activités humaines (Fournier A., 1994). Les populations qui occupent la vallée sont surtout des Bwas et depuis peu des Mossis. La densité de population est de 30 habitants par km². L'agriculture est principalement vivrière (mil, sorgho, maïs) mais la culture du coton se développe dans la vallée sous l'impulsion de l'immigration Mossi venant du nord. L'élevage est peu développé et le cheptel est essentiellement bovin. La population rurale est principalement concentrée sur le plateau, au sud est de la zone, le long de l'axe routier nord / sud entre Dédougou et Bobo-Dioulasso. La population s'installe également dans la vallée où on rencontre de petits hameaux d'agriculteurs, à proximité des terroirs agricoles comme le montre la carte des zones cultivées de la vallée du Mouhoun (Figure 2-5) dressée par photo-interprétation (mission aérienne de 1981, Lavenu F., 1986).

2.2.5 Activité pluviométrique de 1990-1991

La région de Bondoukou est soumise au climat sud-soudanien avec des précipitations oscillant entre 800 et 900 mm/an. La date du début des pluies se situe généralement vers la fin du mois de mai. La saison des pluies s'achève le plus souvent vers les derniers jours de septembre. Notre étude portant sur le comportement temporel du signal AVHRR pendant le cycle février 1990 - février 1991, on s'attachera ici à présenter et à commenter les données météorologiques disponibles sur le site, en ce qui concerne les précipitations. Deux caractéristiques ont été retenues :



- les hauteurs de pluies mensuelles recueillies par la préfecture de Bondoukou. Ces mesures concernent le plateau au sud-est du site. Il n'existe cependant aucune indication permettant de préciser la répartition spatiale de la pluie sur le site.

-Les observations satellitaires Météosat fournies par le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (Lahuec J-P., et Carn M., 1990, 1991). Elles permettent de relier les précipitations locales aux grandes tendances météo-climatiques à l'échelle continentale (localisation 'et dynamique des systèmes nuageux)

La figure 2-6 représente l'évolution mensuelle des pluies, entre janvier 1990 et janvier 1991. Les synthèses des observations satellitaires Météosat signalent que durant les trois

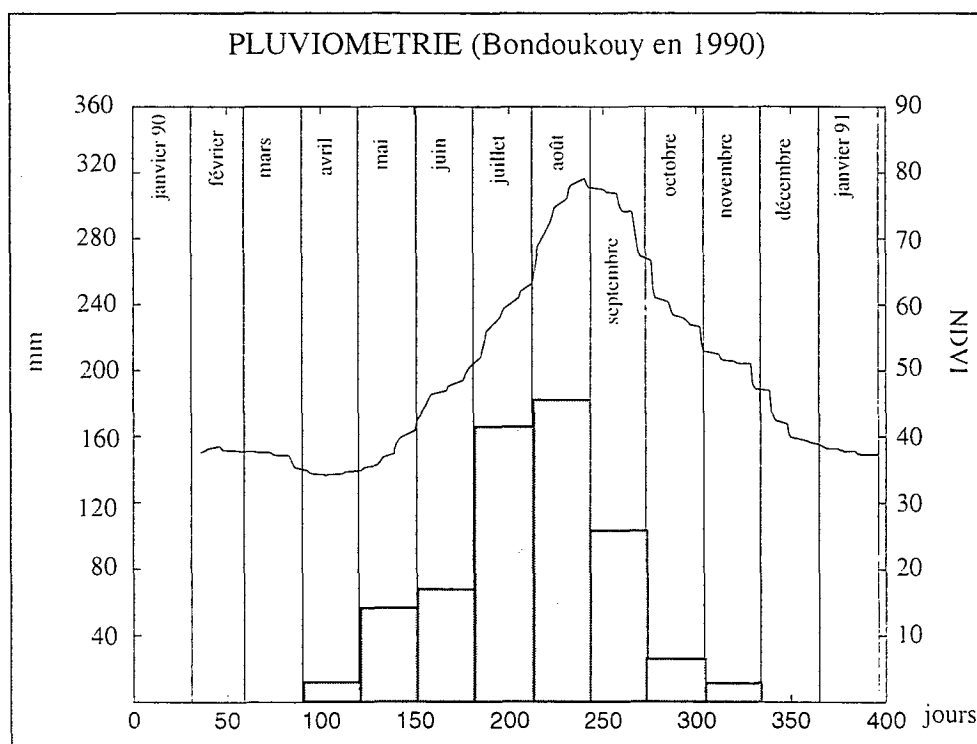


Figure 2-6 :Histogramme des précipitations de la campagne 90-91 à Bondoukou. La courbe des NDVI moyen est exprimée en compte numérique sur 256 niveaux.

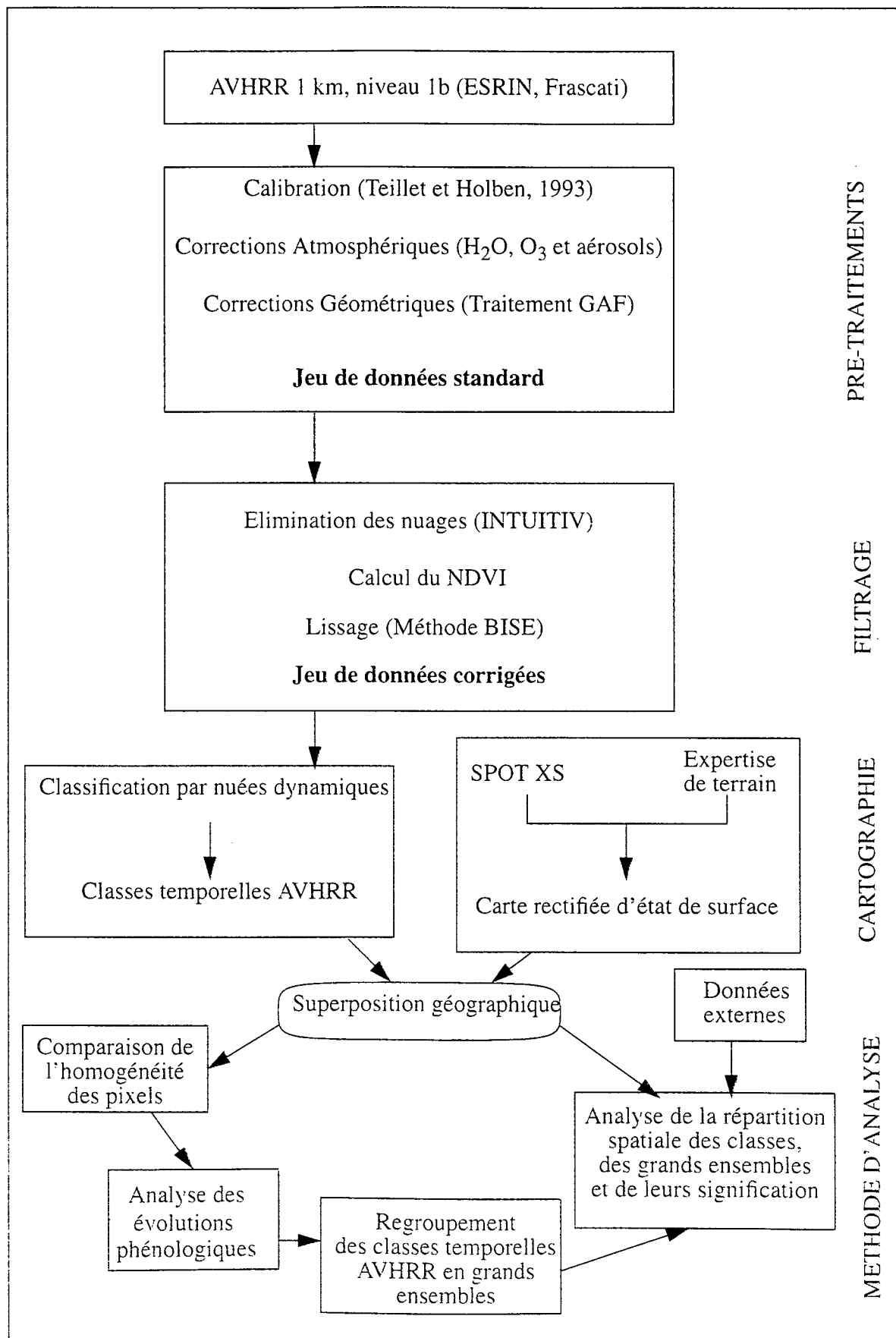
premiers mois de l'année 1990, l'activité convective n'a pas atteint la région de l'étude (du

jour julien 0 au jour 90). A la fin du mois d'avril (jour julien 110 à 120), des remontées convectives précoces apparaissent au sud du Burkina-Faso (10 mm de pluie sont tombés sur Bondoukouy). Les premières véritables activités convectives se manifestent durant la seconde pentade du mois de mai (jour julien 125 à 130) 15 à 30 mm sont tombés dans le centre du pays et 57.2 mm sur notre zone. Des stations météorologiques comme Bobo-Dioulasso (100 km au sud) ont enregistré plus de 100 mm de pluie. Grâce à ces pluies précoces, les premiers semis sont alors possibles. La seconde décade de mai (jour julien 130 à 140) offre des pluies plus irrégulières, contrairement à la troisième décade de mai (jour julien 140 à 150) bien arrosée. Durant le mois de juin (jour julien 152 à 181), le front de convection se déplace de la latitude 10° N à la latitude 17° N provoquant des pluies irrégulières sur Bondoukouy (63.6 mm). Durant le mois de juillet (jour julien 182 à 212), les pluies sont régulières sur l'ensemble de la zone soudano-sahélienne (158 mm). C'est durant la seconde décade du mois d'août (jour julien 222 à 232) que le régime pluviométrique s'affaisse sur l'Afrique de l'ouest, alors que sur le site de Bondoukouy, les pluies atteignent encore 178.6 mm. Seuls de petits phénomènes convectifs apparaissent durant le mois de septembre (jour julien 244 à 273) dans le sud-ouest du Burkina (107.8 mm). Quelques bonnes pluies sauveront les récoltes de la région : il pleut encore un peu en octobre (jour julien 274 à 304, 24.6 mm). Cette année fut exceptionnelle puisque la fin de la saison des pluies n'est pas brutale et que la saison sèche ne s'installe définitivement qu'à la fin novembre (aux alentours du jour julien 330, 11.5 derniers mm). Cette arrière saison humide a également été observée par les équipes de météorologie de Lannion (Lahuec J-P., et Carn M., 1990, 1991). Le NDVI, dont la courbe des valeurs moyennes est représentée dans la figure 2-6, suit fidèlement l'évolution des précipitations qui règlent naturellement l'activité du couvert végétal.

2.3 - DONNEES ET METHODOLOGIE DE TRAITEMENT

La figure 2-7 regroupe l'ensemble des étapes des traitements image et les méthodes suivies pour interpréter les données AVHRR.

Figure 2-7, Démarche de traitement suivie dans l'approche locale (Bondoukou)



2.3.1 Les données AVHRR

2.3.1.1 Les données brutes

Les images AVHRR à haute résolution (1,1 km) sont extraites de la série acquise sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest entre le 1^o février 1990 et le 31 janvier 1991. Elles proviennent des satellites NOAA-10 et NOAA-11 et ont été réceptionnées à la station de Mas-Palomas (Archipel des Canaries - Espagne). Leur format Sharp 1b (Standard HRPT Archive Request Product) correspond à des données brutes, non calibrées et en projection satellitaire. Néanmoins, un certain nombre d'informations sont calculées au niveau de la station de réception et codées dans les fichiers images. Ces données nous ont été fournies par l'ESRIN (Frascati - Italie). Les scènes ont 1441 lignes sur 2048 colonnes sur les cinq bandes spectrales AVHRR. Sur les 400 scènes potentiellement disponibles, 343 images ont été sélectionnées en fonction de leur faible taux d'enneuagement et de leur position sur le transect SALT à partir de la visualisation des "Quick-looks". Ont été éliminées essentiellement les images dont la couverture nuageuse concernait le transect SALT.

2.3.1.2 Calibrations et corrections atmosphériques

Les traitements radiométriques sur les données AVHRR ont été réalisés à partir d'une chaîne de traitement fournie par l'équipe du projet "Monitoring of Tropical Vegetation" de l'"Institute for Remote Sensing Applications" du "Joint Research Center" européen d'Ispra (Italy) : la chaîne GAF (Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung mbH, Falk-Langemann A., 1993). pour laquelle nous avons amélioré les calibrations et ajouté un module de corrections atmosphériques. L'implantation de coefficients plus précis (Teillet P., et Holben B., 1993) nous a permis de faire évoluer la chaîne de traitement des images NOAA-AVHRR en matière de calibration.

Les corrections atmosphériques s'effectuent avec le modèle SMAC (Rahman et Dedieu, 1994). Afin de mener à bien ces corrections, plusieurs routines ou procédures ont été

développées. Il a fallu extraire les angles codés dans les fichiers images (angles zénithaux solaire et d'observation et azimuth relatif entre direction d'éclairement et d'observation), puis se procurer et interpoler (par interpolation bilinéaire) les données atmosphériques. Trois variables sont nécessaires au modèle SMAC : les contenus atmosphériques en vapeur d'eau et en ozone peuvent être estimés à partir des fichiers météorologiques (Oort A., 1983 ; London J., *et al.*, 1976), en revanche les informations sur le contenu en aérosols dans l'atmosphère (visibilité 25 km) ne peuvent pas être restituées réellement, nous avons dans ce cas utilisé une valeur constante¹, dans l'attente de mesures au sol plus fiables, dans le cadre de l'expérience en cours PHOTON (Lavenu F., 1993), qui devraient conduire à une amélioration notable des données satellitaires (Faizoun A., 1991).

2.3.1.3 Corrections géométriques

La seconde partie de la chaîne de traitement est consacrée aux corrections géométriques. La fonction de cette partie du logiciel est de redresser des images AVHRR d'Afrique de l'ouest selon la projection Mercator grâce à une base de points d'amers. Nous n'avons fait aucune modification au sein de cette partie du logiciel GAF. Le traitement s'effectue automatiquement sur station SUN. L'importance du volume de données à traiter a conduit les concepteurs de GAF à prédéfinir deux fenêtres géographiques de projection. Cette adaptation permet de limiter les calculs à une partie de l'Afrique de l'ouest. Le centre des deux fenêtres est situé à 10° de latitude nord alors que les longitudes sont pour la fenêtre A de 7° ouest (Mali) et pour la fenêtre B de 7° est (Niger). Dans une première phase, le logiciel extrait les informations relatives à la navigation de l'image (paramètres d'orbite du satellite) à partir d'un échantillon de pixels équidistants : les points d'attache ou "Tie-points" (32 par ligne et toutes les 16 lignes) sont renseignés : leur longitude et leur latitude sont calculées ainsi que les angles azimutaux et zénithaux solaires et de visée. Le logiciel effectue alors une première navigation de l'image par interpolation à partir de ces points. Toutefois, cette procédure ne suffit pas à superposer de longues séries d'images. Il convient alors d'effectuer une navigation plus précise à partir de points d'amers sur les images.

1. taux d'atténuation choisi : 0.2. correspondant à une atmosphère de turbidité moyenne.

Durant cette seconde phase, le logiciel réalise le calcul des coefficients du polynôme de déformation en fonction des points d'amers disponibles. Il s'agit de repérer ces points d'amers (lac, rivière, côte etc...) visibles sur l'image traitée afin de réaliser une navigation affinée. Grâce au repérage géographique, ces points d'amers sont associés à une base de données attenante sous forme d'images géocodées. Le point d'amer est conservé lorsque le degré de corrélation avec la partie de l'image correspondante est satisfaisant. Pour qu'une image soit redressée, il faut un minimum de quatre points d'amers correctement répartis sur l'ensemble de la scène. A partir de ces points d'amers, le polygone de déformation est recalculé pour affiner la navigation de l'image et garantir dans la projection Mercator une meilleure superposabilité.

Plusieurs limitations de la chaîne GAF sont à signaler. C'est le cas de la perte d'information liée à la prédéfinition des deux fenêtres finales du logiciel. Durant le traitement, les données NOAA 10 n'ont pu être redressées, faute d'avoir trouvé un nombre suffisant de points d'amers satisfaisants. En effet, ces données ont été acquises en orbite descendante sur l'Afrique de l'ouest vers 8 heures du matin et le repérage des images n'a donc pu se faire convenablement. Toutefois, une dizaine de ces scènes ont été utilisées pour être ultérieurement comparées aux données NOAA-11 (orbite ascendante) acquises entre 14 heures et 15 heures le même jour. L'erreur de navigation n'a pu être quantifiée, néanmoins on peut penser qu'une erreur de décalage inférieure à 3 pixels est obtenue dans la majorité des cas. Certaines images, dans les cas les plus extrêmes, peuvent montrer une erreur de 12 pixels (Meunier J-C., 1993). Malgré ces limites, la chaîne GAF reste cependant la seule à pouvoir traiter ce volume de données (343 orbites sur l'Afrique de l'ouest, soit 9 Giga Octets). Ces lacunes sont d'ailleurs en partie compensées par la mise en place de filtres et de lissages sur les séries temporelles, comme indiqué ci-dessous.

2.3.1.4 Extraction de la fenêtre de travail

Un cycle complet permet d'observer le site de Bondoukou 144 fois dans de bonnes

conditions. La série de données est centrée géographiquement sur 12° de latitude nord et 4° de longitude ouest. La fenêtre extraite a une dimension de 100 pixels sur 100 pixels en projection UTM 30 (Universal Transverse Mercator 30^{ème} fuseau, logiciel ER-MAPPER, 4.0, 1993, Earth Ressource Mapping Pty Ltd.). Comme on le verra plus loin, à l'intérieur de cette fenêtre on sélectionnera la zone correspondante à l'image classée SPOT, soit une fenêtre de 37 lignes sur 45 colonnes (1665 pixels).

2.3.1.5 Elimination des nuages : le filtrage thermique INTUITIV

Les perturbations atmosphériques ont diverses origines. Ce sont la vapeur d'eau, les masses d'eau condensée, les brumes de basses couches, les aérosols ou les nuages fins comme les Cirrus. Les pixels contaminés par ces phénomènes nuisent au traitement de grandes séries temporelles car ils modifient le signal électromagnétique reçu par les capteurs. Lorsque la contamination par les nuages est forte, les pixels concernés sont facilement détectables. Dans d'autres cas, en revanche, le signal est relativement peu altéré par ces perturbations. Les pixels concernés ne peuvent alors plus être identifiés à partir de leur seule réponse dans le visible, le proche-infrarouge, ou par leur NDVI. Ils risquent alors d'être considérés comme porteurs d'une information valide sur l'état de surface. Ce phénomène est particulièrement gênant lorsqu'il s'agit de caractériser les périodes clé de la dynamique de la végétation. En effet, comme on le verra plus loin, ces périodes de changement rapide (démarrage ou sénescence de la végétation, notamment) sont fondamentales pour l'analyse des comportements temporels et par voie de conséquence, pour identifier et discriminer spatialement les différentes structures du couvert végétal.

Afin d'éliminer ces contaminations nuageuses, un filtre thermique est appliqué (INTUITIV. Loudjani P. *et al.*, 1994). Celui-ci permet de repérer les pixels contaminés par des nuages, par l'utilisation combinée des réflectances dans le spectre visible et des températures de brillance. Il apparaît, lors de la présence d'un nuage, une augmentation du signal dans les réflectances visible et proche infrarouge. Cette caractéristique peut cependant passer inaperçue si le nuage est de taille inférieure à celle du pixel. Dans le cas d'une contamination nuageuse,

Il n'en reste
de cet : technique
mais plusieurs
de ces fonctions.

les températures mesurées par les canaux AVHRR 4 et AVHRR 5 décroissent rapidement. C'est pourquoi l'utilisation des canaux thermiques s'avère intéressante. Le repérage est donc commode en appliquant des bornes minimales et maximales sur ces quatre canaux pour chaque pixel et pour chaque date d'acquisition. Le seuil thermique calé sur un minimum de 15° C, discrimine convenablement les surfaces souvent chaudes à 14 h 30 (heure de passage NOAA-11 au-dessus de l'Afrique de l'ouest) et les nuages généralement plus froids. Les pixels détectés et signalés sont alors pris en compte lors des calculs d'interpolation avec le filtre BISE (cf paragraphe 2.3.1.7).

2.3.1.6 Calcul du NDVI

La phytomasse photosynthétiquement active présente un comportement radiométrique contrasté selon le domaine spectral considéré : aux faibles niveaux de réflectance du visible s'opposent les fortes réflectances du proche-infrarouge. Sur ces bases des combinaisons et des rapports de canaux ont été mis au point depuis longtemps pour élaborer des "indices de végétation" rendant compte de cette activité photosynthétique. Il existe actuellement un foisonnement d'indices de végétation comme par exemple le SAVI (Huete A., 1988), le MSAVI (Qi J., *et al.*, 1994) ou bien le GEMI (Pinty B., *et al.*, 1992). Chacun de ceux-ci est adapté à un type d'étude (Pichon J.-C., 1994; Verstraete M., *et al.*, 1993).

Dans le contexte de notre travail, il nous a semblé préférable de conserver un indice connu et utilisé par l'ensemble de la communauté scientifique. En effet, la connaissance des défauts et des qualités d'un indice testé de longue date garantit une meilleure comparabilité, dans l'attente de futurs capteurs (ou de futurs indices...). C'est donc le NDVI (indice de végétation aux différences normalisées) qui a été utilisé dans cette étude (Rouse J., *et al.*, 1974). Les valeurs théoriques de cet indice sont comprises entre -1 et +1. Son pouvoir séparateur est appréciable : les nuages, l'eau et la neige ont une plus grande réflectance dans le visible que dans l'infrarouge, leur NDVI est donc négatif et on peut ainsi les isoler aisément. Les roches et les sols nus, par contre, ont une réflectance semblable dans le visible et le proche infrarouge, leurs indices varient de part et d'autre de la valeur zéro. Le NDVI de la végétation

évolue de 0.1 à 0.8, la réflectance dans le proche infrarouge étant nettement supérieure à celle du visible. Ainsi, pour les couvertures végétales, les hautes valeurs caractérisent logiquement les plus fortes densités de biomasse verte (Bariou R., *et al.*, 1987).

Tous ces indices présentent un certain nombre de limitations, à commencer par le NDVI. Celui-ci, en effet, est sensible aux perturbations atmosphériques et notamment à la vapeur d'eau (en particulier le proche-infrarouge) (Tanré D., *et al.*, 1992, Faizoun C., *et al.*, 1994). Il sature au-delà de 0.8 c'est-à-dire qu'à partir d'une certaine densité végétale correspondant à un LAI de 4 ou 5 (cultures, forêts tropicales...) il ne permet plus de distinguer les taux de couvert (Goward S., et Huemmrich K., 1992). Enfin, l'interprétation du signal est rendue plus délicate encore par l'amalgame des réflectances de la végétation et de la brillance du sol sous-jacent (Qi J., *et al.*, 1994).

+

2.3.1.7 Lissage des courbes temporelles : le filtrage BISE

Après le filtrage thermique des données, les courbes temporelles NDVI ne sont généralement pas d'une lecture facile. Les nombreuses dents de scie qui accidentent ces courbes expriment un fort bruitage d'origine très variée : conditions atmosphériques résiduelles, géométrie de visée, variation effective du NDVI... Il est donc nécessaire de limiter ce bruitage excessif pour pouvoir comprendre ces courbes : c'est l'objet du lissage. Cette démarche se justifie par l'impossibilité de travailler avec des données trop parasitées qui entraînent des erreurs dans la caractérisation des phases cruciales du développement végétal, qui sont, comme on le verra plus loin, à la base de notre caractérisation phénologique.

Cependant le lissage de l'information temporelle est nécessairement un compromis entre l'élimination du bruit et la sauvegarde de l'information. Il est en effet difficile de reconnaître a priori si certaines variations du signal correspondent effectivement à un bruit ou si elles véhiculent une information thématiquement exploitable.

et si le + important
est le bruit

La procédure de lissage est conduite de la façon suivante : le pourcentage annuel d'ennuagement calculé par le filtre thermique (nombre de pixels contaminés) définit une fenêtre glissante de lissage. Plus le taux d'ennuagement est élevé, plus la durée pendant laquelle les enregistrements satellitaires sont perturbés est longue et plus la fenêtre de lissage appliquée devra être importante. Le pourcentage annuel d'ennuagement de chaque pixel est estimé en divisant le nombre de valeurs contaminées par le nombre total annuel de valeurs. La longueur de la fenêtre glissante est ensuite linéairement reliée au pourcentage d'ennuagement. La longueur minimale de la fenêtre est fixée à quatre dates lorsque l'ennuagement est nul, et la longueur maximale à seize dates pour un ennuagement permanent. Cette fenêtre correspond au nombre de dates avant et après chaque acquisition, nécessaire pour calculer la valeur réaliste du pixel à une date donnée. Les calculs de lissage de l'information mesurée sont individuels pour chaque pixel, dont la fenêtre de lissage est déterminée en fonction du résultat obtenu par le filtre thermique. La fenêtre obtenue par ce filtre est alors utilisée par le lissage BISE (Viovy N., *et al.*, 1992) sur les NDVI à un kilomètre de résolution. Cette méthode permet de traiter automatiquement des séries temporelles importantes de façon satisfaisante et d'éliminer les pixels suspectés d'anomalies d'enregistrement ou contaminés par des nuages. Dans la figure 2-8 sont présentés les résultats des étapes successives du traitement à partir des données brutes jusqu'aux profils temporels utilisés dans la procédure de classification décrite ci-dessus. L'exemple présenté est celui d'un pixel situé au centre de la fenêtre de travail (pixel : ligne 55, colonne 42).

2.3.1.8 Classification des données NDVI-AVHRR

Le jeu de données obtenues correspond à une collection de "pixels temporels", caractérisés par leur courbe (ou leur profil) temporelle propre. Il s'agit maintenant de procéder à un classement de ces pixels et d'en donner une représentation spatiale, qui exprime l'évolution phénologique d'un certain nombre de types de couvertures végétales. La procédure choisie pour classer les "pixels temporels" est la classification par nuées dynamiques mise au point par Viovy N., (1990). Il s'agit d'une classification entièrement automatique, qui ne prend en compte que les données NDVI, sans aucun contrôle terrain, ni informations extérieures.

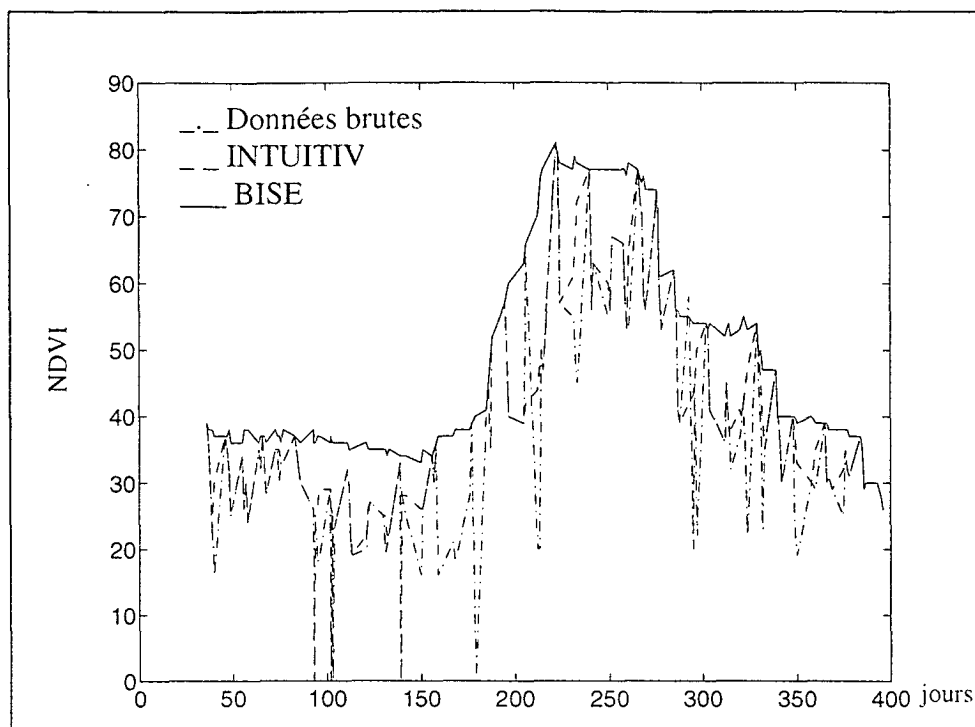
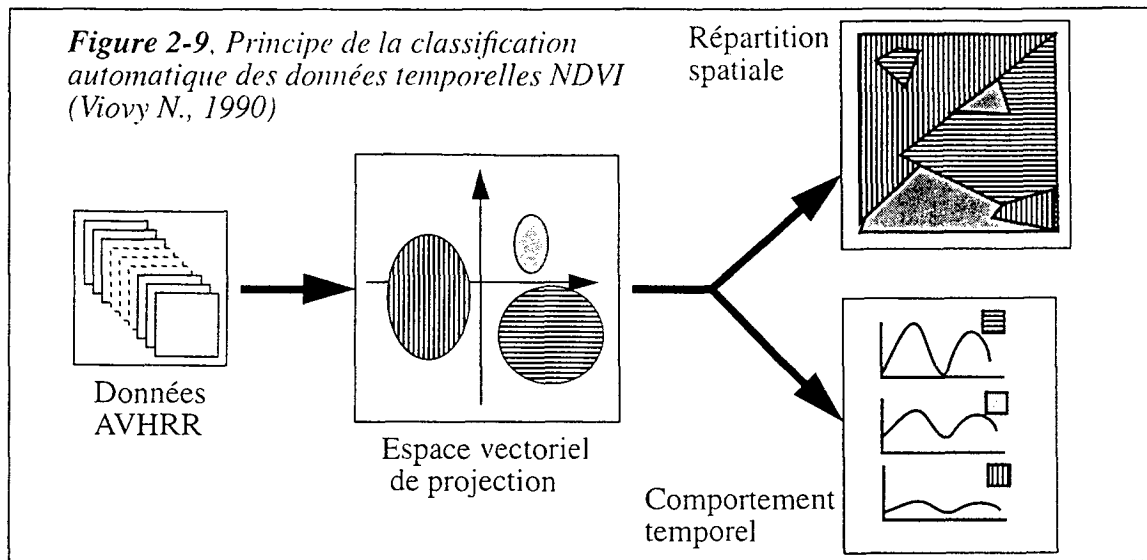


Figure 2.8 : Courbes temporelles NDVI après filtrage (INTUITIV) et lissage (BISE) effectués sur les données AVHRR à un kilomètre de résolution, sur le site de Bondoukou.

Cette méthode (cf Annexe C) permet de délimiter des groupes de pixels ayant des comportements temporels homogènes. Mise au point pour classer les données multitemporelles, la méthode consiste à projeter chaque pixel dans autant de dimensions qu'il y a d'acquisitions temporelles (figure 2-9). Il en résulte un nuage vectoriel de points dont la localisation et l'étendue sont dépendantes de son évolution. On calcule le centre du nuage de points, puis une séparation dichotomique est appliquée dans la direction d'allongement maximal pour effectuer une scission de ce nuage en deux. Un nouveau calcul des centres respectifs est opéré. Puis, de nouveau, une séparation de chacun des nuages est effectuée. Plusieurs itérations du modèle sont nécessaires pour bien discriminer des groupes homogènes de pixels. Des regroupements de classes trop petites sont nécessaires pour éviter une dispersion excessive des ensembles. Sur le site de Bondoukou, quatre itérations ont permis d'obtenir seize classes (Figure 2-10). L'image de cette classification des pixels temporels AVHRR sera interprétée visuellement à la fin de ce chapitre (cf paragraphe 2.5).



Cette procédure de classification par nuées dynamiques, rappelons-le, a conduit à traiter l'ensemble des données NDVI sans tenir compte des conditions géométriques d'acquisition (élévation solaire, angle de visée, azimuts etc...). Pour tester l'influence de l'absence de prise en compte de ces conditions géométriques d'acquisition, on a procédé à un test comparatif sur le site d'HAPEX-Sahel/SALT de Banizoumbou (Niger), site qui est convenablement reconnu au sol (cf Annexe D). Sur ce site, on a effectué d'abord une classification par nuées dynamiques, identique à celle utilisée sur le site de Bondoukou. Ensuite, on a appliqué un modèle de réflectances bidirectionnelles (Rahman H., *et al.*, 1993) sur quelques pixels bien identifiés. La comparaison des courbes temporelles de ces pixels et de celles des classes correspondantes de la classification par nuées dynamiques montre un ajustement satisfaisant entre les courbes et justifie ainsi l'utilisation de la classification automatique employée (Gond V., *et al.*, 1995).

2.3.1.9 Principe de caractérisation du cycle phénologique

L'évolution temporelle des NDVI sur les différents biomes permet de caractériser l'activité chlorophyllienne du couvert au cours du temps (Tucker C., *et al.*, 1985). Un cycle annuel peut être ainsi défini par un niveau moyen du signal, traduisant l'activité de la biomasse verte ainsi que les variations décrivant la phénologie du milieu. Ce cycle peut être

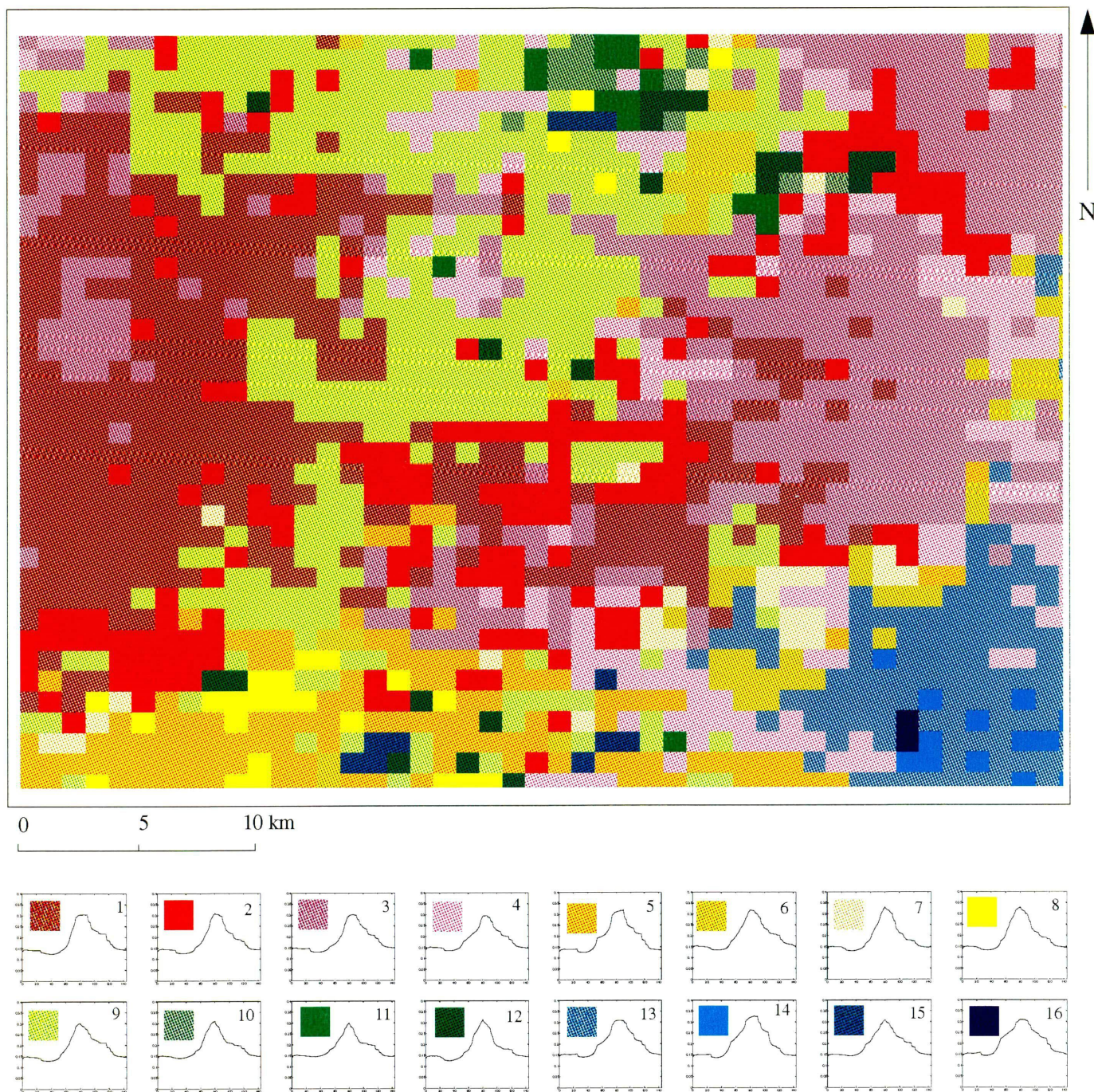
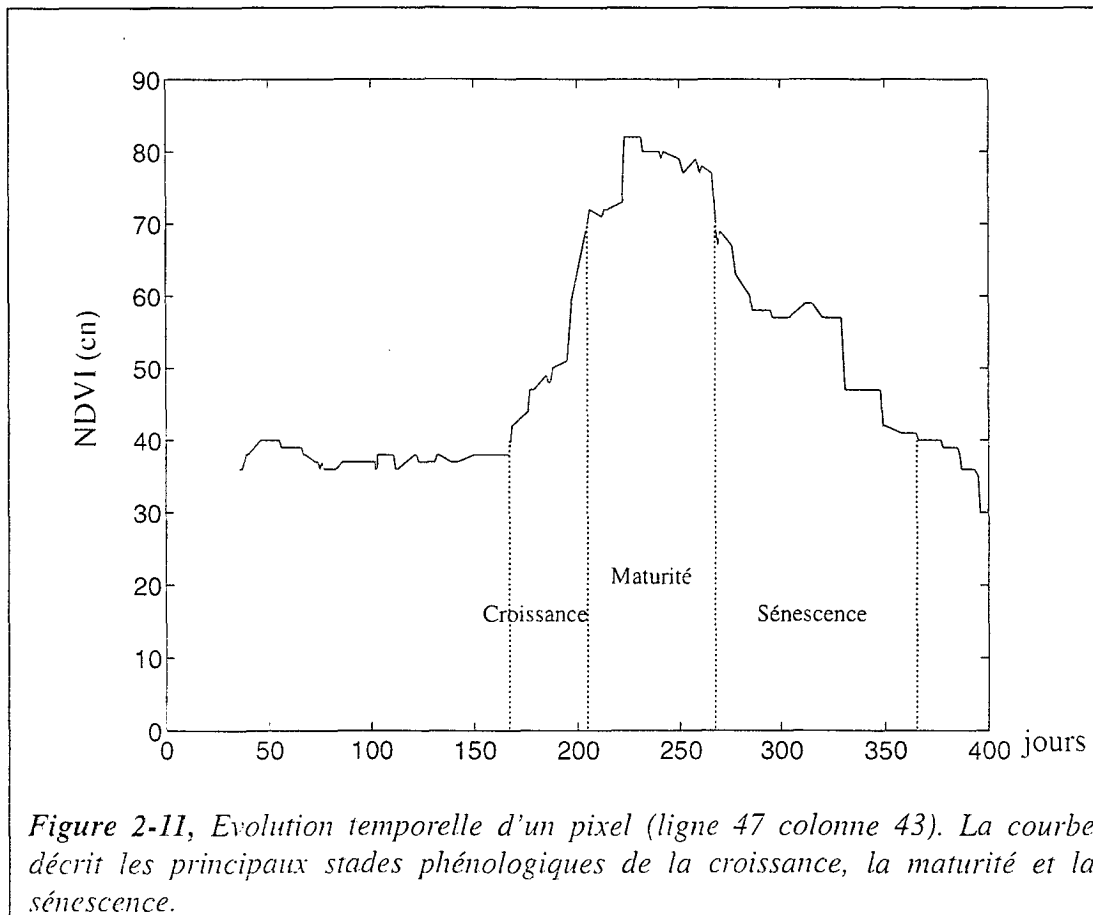


Figure 2-10 : Classification NDVI (NOAA-AVHRR) par nuées dynamiques du site de Bondoukou, sur la période du 1 février 1990 au 31 janvier 1991 (144 dates).

paramétré par différentes variables renseignant sur le stade phénologique. On peut observer la rapidité avec laquelle la valeur du NDVI varie au cours du temps, traduisant ainsi les variations de l'activité photosynthétique de la biomasse verte. Les parties ascendantes et descendantes de la courbe décrivent les périodes de croissance et de sénescence de l'écosystème. L'analyse du cycle permet aussi d'apprécier la durée de la phase "en plateau", correspondant au stade de maturité de la végétation et à la période d'assimilation maximale du carbone par les plantes constituant l'écosystème. Enfin, la hauteur du plateau sur l'échelle des NDVI renseigne, quant à elle, sur le niveau d'activité photosynthétique, supposé exprimer la quantité de biomasse présente (Figure 2-11). On reviendra plus loin sur la définition et la mesure de ces paramètres phénologiques (cf paragraphe 2.5)..



2.3.2 Les données SPOT et leur exploitation

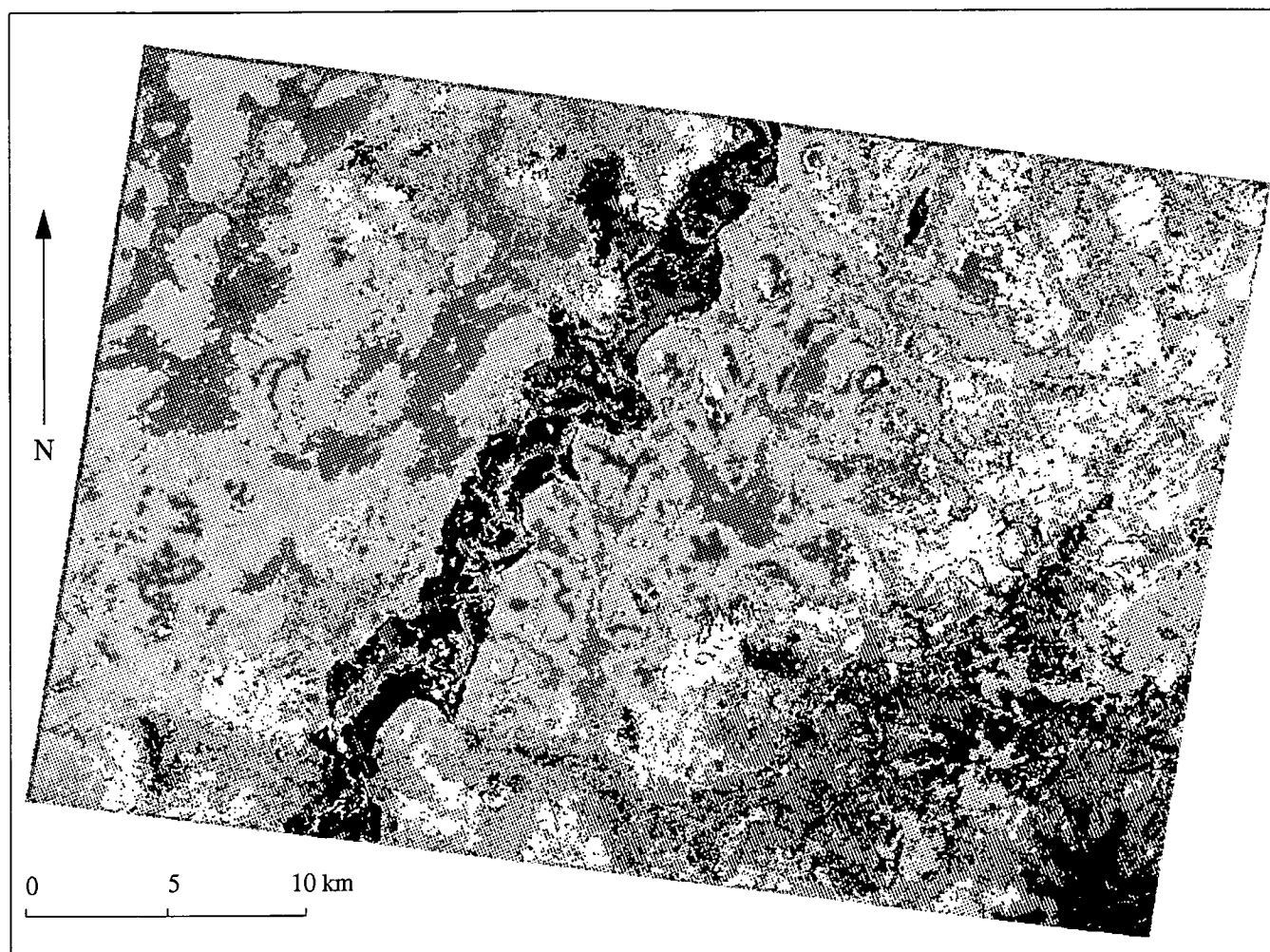
Comme on l'a indiqué au début de ce travail, rappelons que c'est largement à partir de l'exploitation de ces données à haute résolution spatiale que nous conduirons, dans la suite de notre travail, l'analyse des pixels AVHRR. Concernant ces données SPOT, l'essentiel de notre travail a consisté à assurer leur superposabilité aux données AVHRR.

2.3.2.1 La classification thématique de l'ORSTOM

La carte d'occupation du sol (Devineau J.L. et Kaloga B., 1992) a été établie à partir de la classification d'une image SPOT de juin 1990, complétée par celle de janvier 1989 pour les zones inondables (Figure 2-12). Cette carte, produite à partir d'une classification de type supervisée, a été réalisée sur des parcelles d'entraînement reconnues au sol par J.L. Devineau et B. Kaloga. Ces zones d'entraînement ont permis alors d'extrapoler l'information spectrale à l'ensemble de la scène. La classification comporte 14 classes descriptives de l'état de surface en terme de type de couverture végétale et de sols. Les informations concernant l'utilisation agricole et pastorale n'ont pas été prises en compte dans cette classification. Un problème s'est rapidement fait jour : celui de la discordance géométrique entre les données corrigées AVHRR et les données SPOT traitées et classées à l'ORSTOM, non redressées et dépourvues de coordonnées géographiques. Ceci nous a conduit à établir un cadre de projection SPOT fiable de manière à y reprojeter la classification de l'ORSTOM. ??

2.3.2.2 Rectification géométrique de la classification de l'ORSTOM

Pour assurer une superposabilité satisfaisante des pixels AVHRR et des pixels SPOT, il nous a fallu redresser l'image classée obtenue par l'équipe de l'ORSTOM. Dans l'impossibilité de disposer des données brutes relatives aux images SPOT de Bondoukou, nous avons dû faire appel à deux autres images SPOT, de dates différentes, du même site. Ceci a conduit à l'élaboration d'une trame géocodée en projection UTM 30, sous la même procédure que celle utilisée pour les données AVHRR (ER-MAPPER.4.0, 1993, Earth

















- | | | | |
|--|---|---|---|
|  | Sols hydromorphes à pseudogley.
Savane arborée claire (parc) ou arbustive claire. Recouvrement ligneux < 25 %. |  | Sols : cf 1 et 2.
Savane boisée ou arbustive assez dense. Recouvrement 25 - 50 %. |
|  | Sols ferrugineux tropicaux hydromorphes.
Savane arborée claire (parc) ou arbustive claire. Recouvrement ligneux < 25 %. |  | Sols : cf 5.
Savanes de physionomie variée. Recouvrement 25 - 50 %. |
|  | Lithosols sur cuirasse ferrugineuse à faible recouvrement gravillonnaire. Savane arbustive peu dense. Recouvrement non évalué. |  | Sols ferrugineux tropicaux, sols ferrugineux tropicaux hydromorphes.
Savane boisée assez dense. Rec. 50 - 75 %. |
|  | Sols ferrugineux tropicaux indurés à carapace ferrugineuses de bas glacis.
Savane peu dense. Recouvrement non évalué. |  | Sols hydromorphes alluviaux.
Savane arbustive ou arborée. Recouvrement 25 - 50 %. |
|  | Sols variables, ferrugineux tropicaux hydromorphes en profondeur, ferrugineux tropicaux, ferrallitiques. Recouvrement < 25 %. |  | Sols idem 11.
Prairie et savane herbeuse inondable. |
|  | Sols peu évolués gravillonnaires, lithosols.
Végétation variable savanes boisées, arborées ou arbustives. Recouvrement < 25 %. |  | Sols divers.
Formation forestière. |
|  | Lithosols sur cuirasse ferrugineuse, bowé.
Sols à hydromorphie de surface dans la plaine d'inondation. Savane claire. Rec. < 25 %. |  | Sols ferrugineux tropicaux hydromorphes ou sols sur matériau gravillonnaire profond.
Savane boisée dense. Rec. > 50 et > 75 %. |

Figure 2-12 : Classification SPOT du Site SALT de Bondoukou (Devineau J-L., et Kaloga B., 1992).

Ressource Mapping Pty Ltd.). Les données SPOT et AVHRR se trouvant sous la même projection, elles deviennent donc superposables. L'image classée ORSTOM, redressée à partir de quelques points d'amers repérés au sol par le système GPS (Ground Position System), est ainsi ajustée à la trame géocodée UTM 30. La précision du positionnement, de l'ordre de la centaine de mètres, est donc suffisante pour pouvoir comparer les différents types d'information.

2.3.2.3 Analyse comparative visuelle des classifications AVHRR et SPOT

La comparaison visuelle des deux classifications ne permet pas de dégager clairement des relations entre les classes SPOT décrites par J-L. Devineau et les classes AVHRR. Seules, dans le coin sud-est des deux classifications, les formations à densité plus élevée de ligneux du plateau de Bondoukou semblent coïncider partiellement (classe SPOT 14 / classes AVHRR 15 et 16). A cette exception près, il est très difficile d'approfondir l'analyse comparative visuelle et d'aller plus loin dans la compréhension de la signification de la classification AVHRR.

cela
suffit
à dire
que si on
comparait
les deux
classifications
on ne peut
pas dire
qu'elles
coïncident
sur la
classification

Il nous faut donc procéder selon une approche différente, qui permette d'établir des regroupements cohérents entre les classes AVHRR et d'avancer ainsi vers l'interprétation thématique de la classification AVHRR.

2.4 - IDENTIFICATION ET ANALYSE DES PIXELS AVHRR HOMOGENES

2.4.1 Méthode d'analyse des pixels temporels AVHRR

L'objectif principal de notre travail sur Bondoukou consiste à rechercher les relations existant entre, d'une part, l'image des pixels temporels AVHRR (figure 2-10), que l'on peut assimiler à une sorte de cartographie du comportement phénologique des couvertures végétales, et d'autre part, des structures paysagères de la savane identifiées à la fois au sol, à travers différents documents cartographiques et sur l'image classée de SPOT (figure 2-12).

cad !

Pour mettre à jour ces relations, on procède selon trois étapes principales :

Dans la première étape, on cherche à mesurer le degré d'homogénéité de chacun des pixels AVHRR de chaque classe de la classification automatique, en terme de proportions de classes de pixels SPOT présents dans chaque pixel AVHRR. Ceci nous conduit à identifier, pour un certain nombre de classes au moins, les pixels AVHRR les plus homogènes de ce point de vue. Il sera alors possible, sur les pixels AVHRR identifiés comme homogènes et regroupés par classe AVHRR, d'analyser et comprendre les principales caractéristiques du comportement phénologique de ces classes, en fonction de leur composition dominante en terme de pixels SPOT.

La seconde étape est consacrée à une analyse comparative et discriminante des courbes de comportement temporel de chaque classe AVHRR, de façon à dégager quelques paramètres phénologiques simples, directement mesurables sur les courbes du signal NDVI. On tentera alors, sur ces bases, de regrouper les classes de pixels AVHRR en quelques grands ensembles de comportement phénologique.

A partir des résultats précédents, on procédera à une confrontation visuelle entre les classifications AVHRR, SPOT et les autres documents disponibles. En localisant les pixels AVHRR appartenant à ces grands ensembles de comportement phénologique précédemment définis, on tentera de tester le degré de correspondance entre les grands ensembles de comportement phénologique et les structures de paysages reconnues sur les images et documents de référence.

2.4.2 - Recherche des pixels homogènes

L'analyse comparative des deux plans cartographiques (classification SPOT et classification temporelle AVHRR) a pour objet de déterminer le degré de correspondance entre les pixels AVHRR et les pixels SPOT, selon leur appartenance de classe. Seize roses des vents représentent les seize classes AVHRR au sein desquelles se répartissent les quatorze

secteurs décrivant les classes SPOT (Figure 2-13 et 2-14).

*l'auteur ne donne au cours
de l'étude que les 16
classes AVHRR.*

2.4.2.1 Répartition des classes SPOT dans les classes AVHRR

La distribution des quatorze classes SPOT (en pourcentage de pixels SPOT) dans les seize classes AVHRR a été calculée (Tableau 2-1). Ici, tous les pixels AVHRR correspondant à

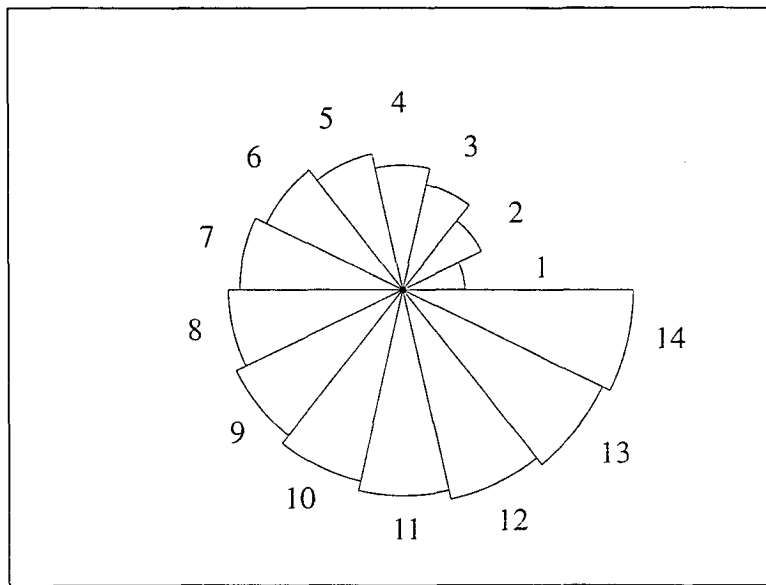


Figure 2-13 : Répartition des classes SPOT dans les classes AVHRR. Chaque "pétale" matérialise proportionnellement à sa surface le pourcentage d'occupation par une classe SPOT.

la fenêtre SPOT ont été traités, y compris ceux situés à cheval sur les limites de cette fenêtre. Les grandes tendances sont ainsi mises en évidence. Par exemple, la classe SPOT 2 se retrouve souvent dominante dans les grandes classes AVHRR 1, AVHRR 2 et AVHRR 9. Les classes AVHRR 10, 11 et 12 ne sont, quant à elles, que peu représentatives, puisqu'elles ne couvrent qu'à peine 2% de la surface de la zone étudiée. On peut déjà, à ce stade, formuler deux observations générales :

- d'une part, si l'on considère la superficie occupée par les classes AVHRR, seules les classes 1, 2, 3, 4, 9, et 13 apparaissent comme significatives et intéressantes à étudier, dans la

Figure 2-14, Répartition des 14 classes SPOT dans les 16 classes AVHRR

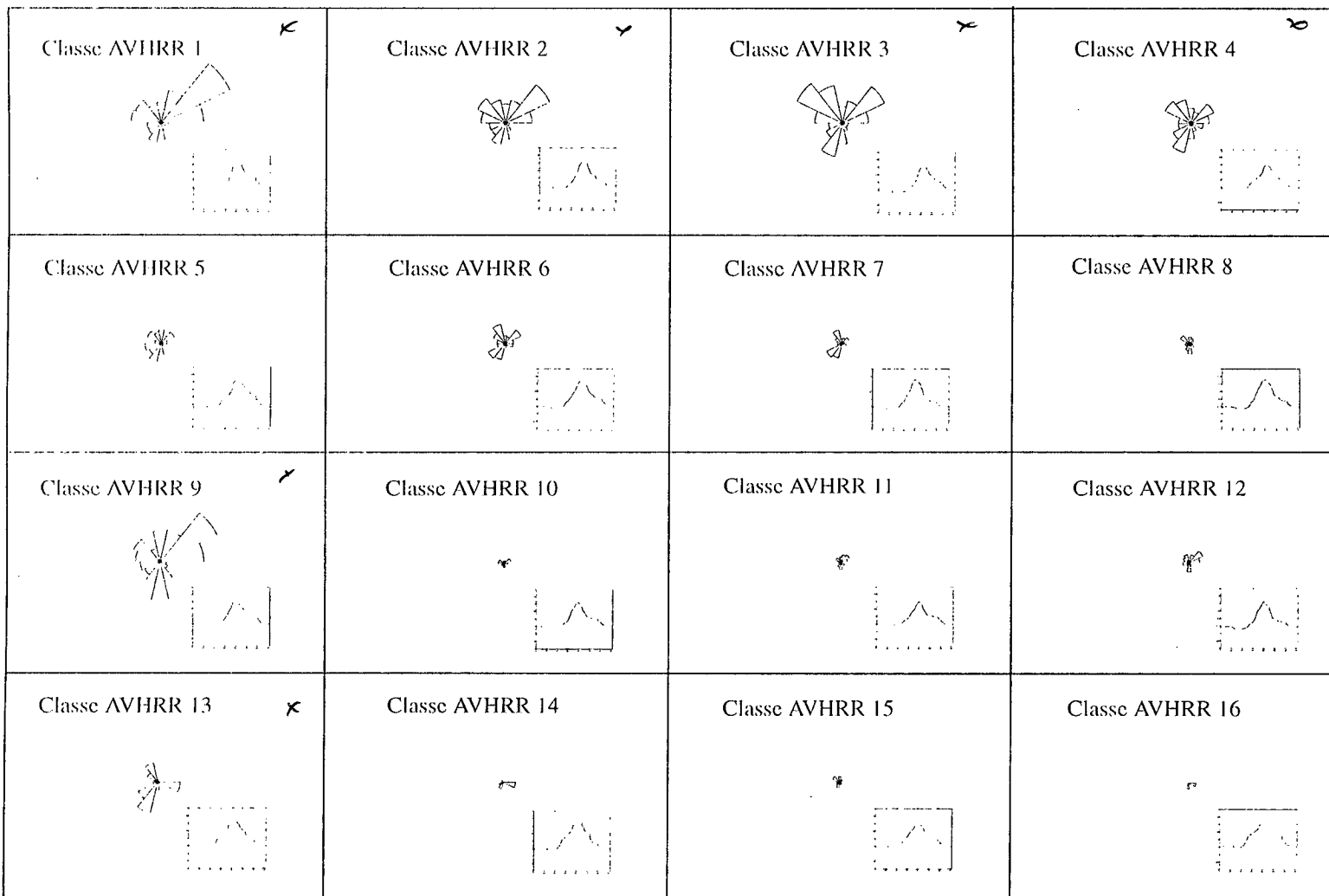


Tableau 2-1 : Répartition (en %) des classes SPOT dans les classes AVHRR. Les tramés gris sombres marquent les dominantes les tramés gris clairs les sous dominantes.

Class. SPOT / Class. AVHRR	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Nb pi. SPOT	% AVHRR
1	14.41	46.39	9.05	3.40	3.10	6.51	7.30	1.59	1.61	3.36	2.39	0.41	0.13	0.34	821299	21.36
2	9.26	31.54	7.14	4.84	7.40	13.01	8.12	3.52	3.29	6.74	3.82	0.95	0.16	0.20	500299	13.01
3	6.34	20.43	4.91	2.62	13.88	23.93	7.19	1.77	3.03	10.65	4.07	0.62	0.28	0.28	715886	18.62
4	6.81	13.19	3.04	4.86	12.54	17.23	3.23	3.37	8.30	18.28	4.69	1.38	0.07	3.01	316017	8.22
5	1.93	10.96	3.99	9.65	6.88	12.71	2.07	13.99	9.30	18.95	7.02	0.50	0.40	1.65	124764	3.24
6	3.71	15.88	2.53	3.31	20.29	9.09	3.54	3.29	18.36	14.05	1.43	0.59	0.57	3.34	126702	3.29
7	0.77	6.62	3.52	2.50	21.35	5.90	2.50	1.93	30.25	21.89	0.43	0.01	0.24	2.10	63525	1.65
8	0.55	4.40	6.86	10.44	0.45	25.22	2.11	4.83	3.17	11.40	22.96	1.46	4.55	1.60	29542	0.76
9	14.83	30.97	8.51	7.65	1.60	6.65	4.74	3.03	2.19	3.72	12.22	3.02	0.56	0.31	850746	22.13
10	6.44	28.09	7.51	6.85	0.45	18.29	16.98	3.25	0.54	2.19	6.15	3.14	0.12	0.00	13896	0.36
11	11.36	24.00	15.98	7.94	2.11	8.06	3.22	1.68	0.41	6.60	12.32	1.20	5.04	0.07	24870	0.64
12	14.38	29.80	8.88	4.23	9.51	5.99	3.51	5.50	0.97	2.21	12.48	2.16	0.32	0.06	49071	1.27
13	0.07	0.06	0.11	0.19	14.70	5.09	0.41	0.79	17.59	39.12	2.39	0.01	0.23	19.25	171066	4.45
14	0.00	0.00	0.00	0.04	1.75	0.44	0.00	0.00	6.70	17.78	6.44	0.00	0.00	66.85	15951	0.41
15	0.47	5.78	5.35	16.64	2.44	29.18	4.62	3.71	6.37	13.90	4.29	1.45	3.89	1.88	13867	0.36
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.73	2.38	33.59	0.00	1.49	61.82	6050	0.15
Nb pi. SPOT	376371	1054903	249929	179955	294140	459828	218139	109502	183983	360633	221980	46519	14009	73660	3843551	
% SPOT	9.79	27.45	6.5	4.68	7.65	11.96	5.68	2.85	4.79	9.38	5.78	1.21	0.36	1.92		100

2 - Approche locale : identification des savanes de Bondoukou à partir des données AVHRR

Après la
répartition
des données
le savant

mesure où elles représentent plus de 85% de la superficie totale de la zone.

- d'autre part, les deux classes AVHRR les plus étendues, la 1 et la 9, qui occupent conjointement près de la moitié de la zone ($21.36 + 22.13 = 43.49\%$) présentent des comportements en pourcentage des classes SPOT très comparables, dominées par les classes SPOT 1 et 2. Celles-ci caractérisent des savanes parcs à faible densité de ligneux, où une part importante de l'espace est consacrée aux cultures.

2.4.2.2 Identification des pixels homogènes

Un programme de calcul (Annexe E) a été établi de façon à connaître la composition de chacun des pixels AVHRR en terme de pourcentage de pixels SPOT appartenant à une classe SPOT donnée. N'ont été retenus ici que les pixels "complets" ($55 \times 55 = 3025$ pixels SPOT), les pixels situés à cheval sur les limites de la fenêtre SPOT étant éliminés pour ne pas fausser les valeurs en pourcentage.

Trois catégories de pourcentages de pixels AVHRR occupés respectivement à plus de 90%, 80% et 70% par des pixels SPOT appartenant à une seule classe SPOT, ont été calculées. Les résultats de ce calcul sont présentés dans l'annexe E pour les valeurs supérieures à 90%. En effet, au-dessous de 70% d'homogénéité (en terme de pixels SPOT de même classe), il devient extrêmement difficile de distinguer entre les différents comportements temporels. On identifie ainsi trois catégories de pixels AVHRR selon leur pourcentage d'homogénéité : x à 90% d'homogénéité, y à 80% et z à 70%.

2.4.2.3 Regroupement des pixels AVHRR homogènes par classe AVHRR

Pour chacun des pixels retenus comme homogènes, on constitue un fichier de 144 valeurs temporelles de NDVI. Sur l'ensemble des pixels homogènes appartenant à une même classe AVHRR, et pour une même catégorie d'homogénéité (plus de 90%, 80%, 70%) on procède au calcul des moyennes sur les 144 valeurs NDVI du cycle. On obtient ainsi une courbe temporelle caractérisant certaines classes AVHRR constituées d'au moins un pixel

Figure 2-15, Classe AVHRR 1 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.

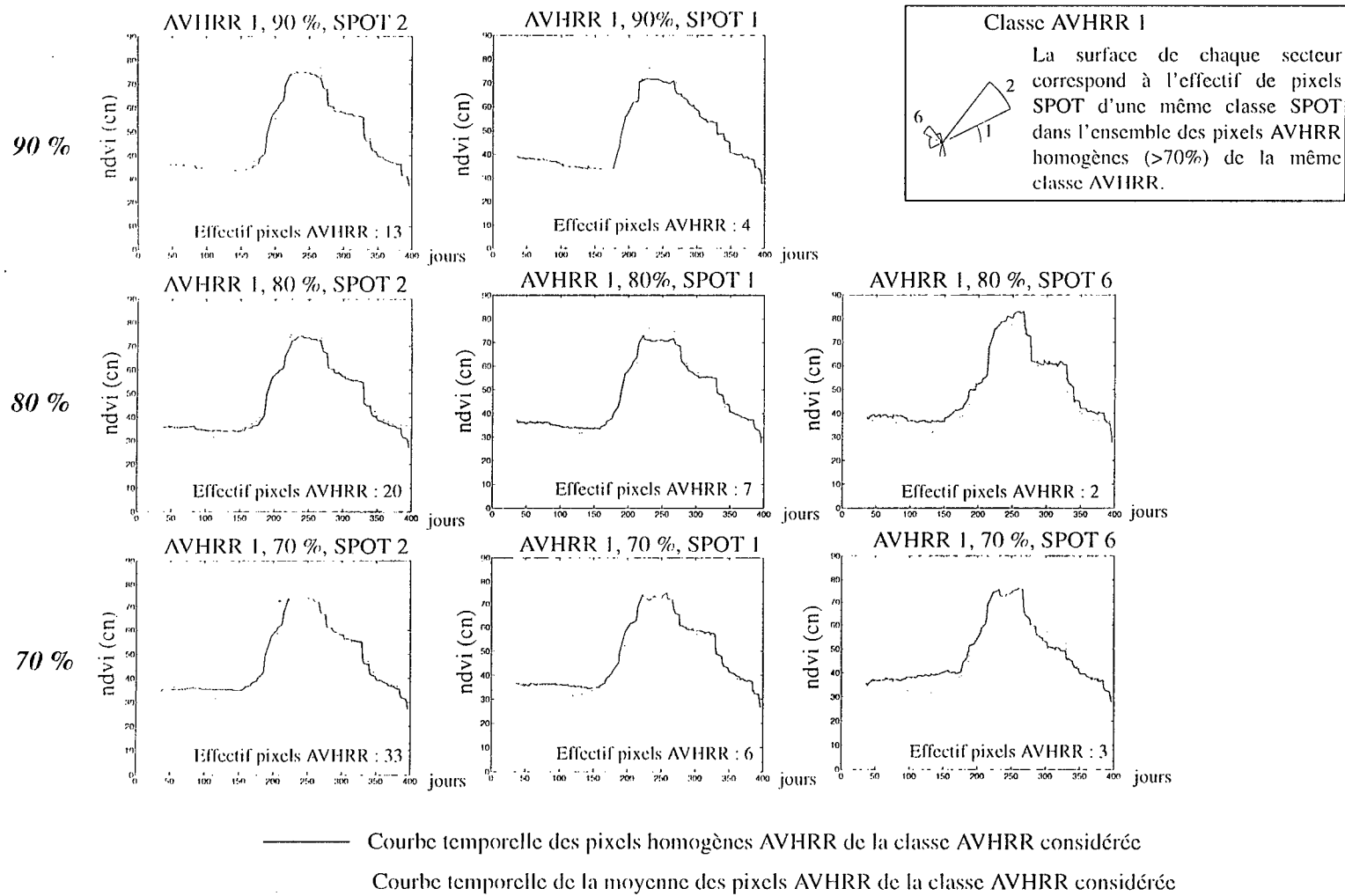


Figure 2-16, Classe AVHRR 2 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.

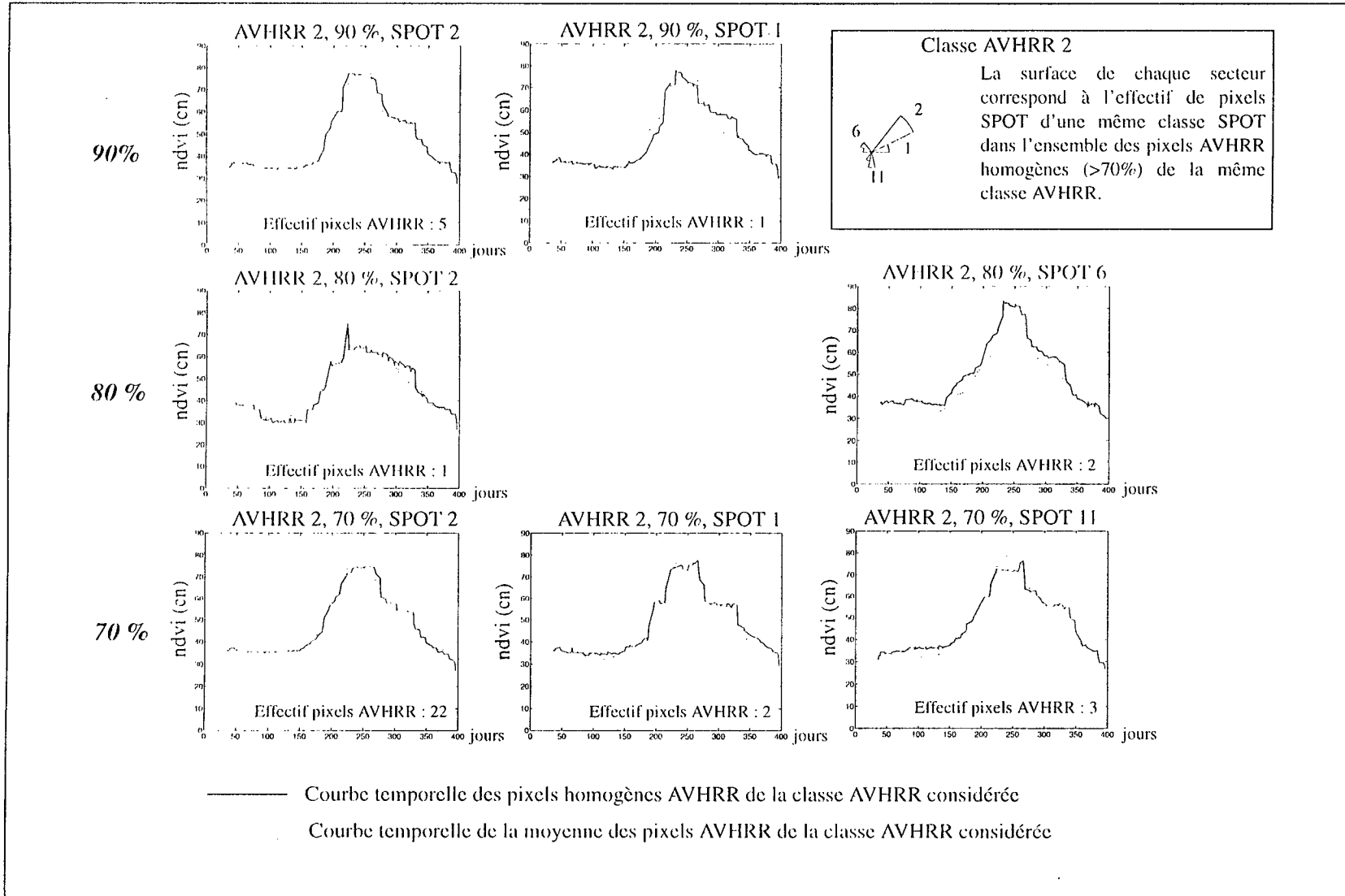


Figure 2-17, Classe AVHRR 3 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.

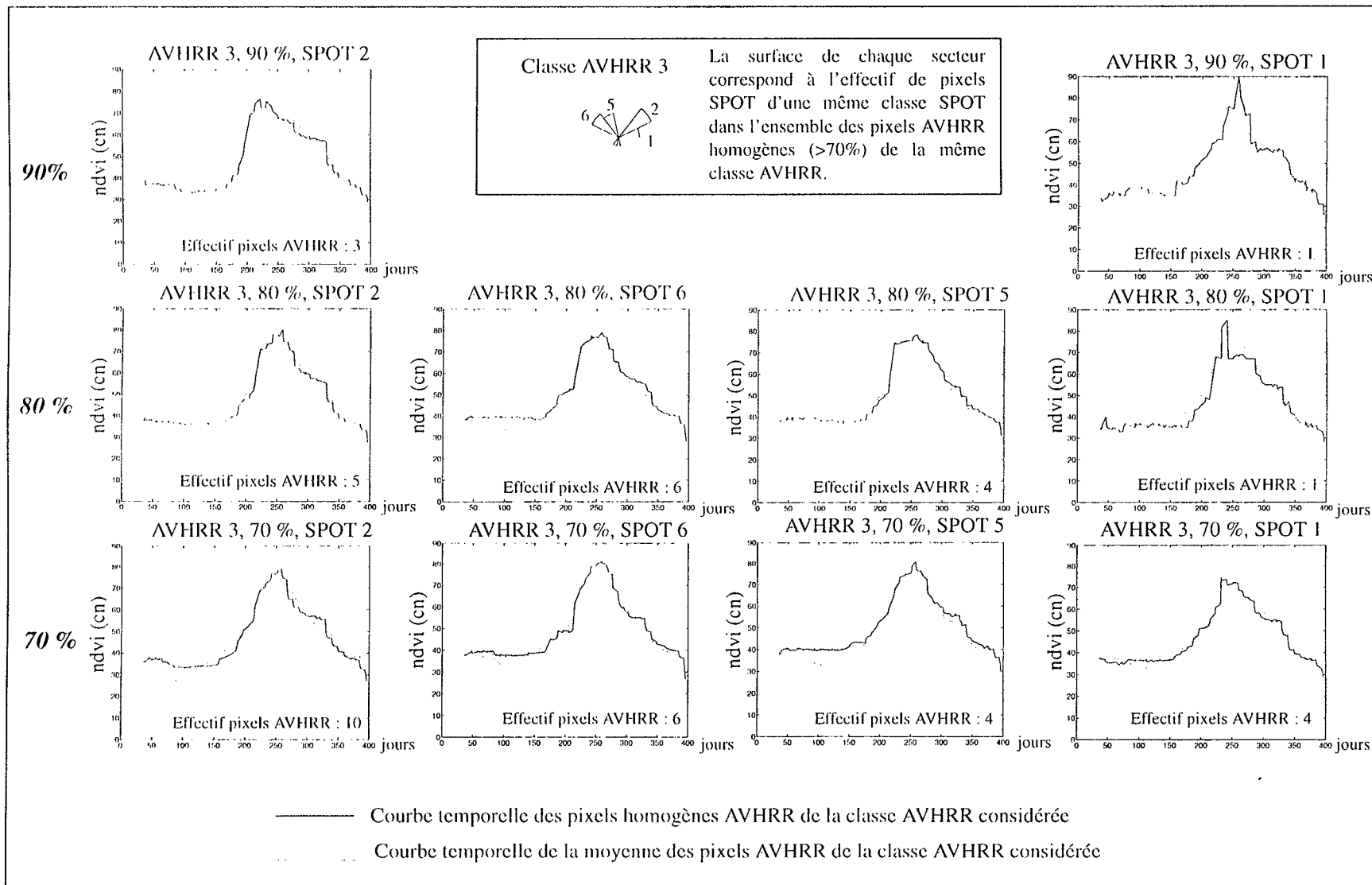


Figure 2-18. Classe AVHRR 4 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.

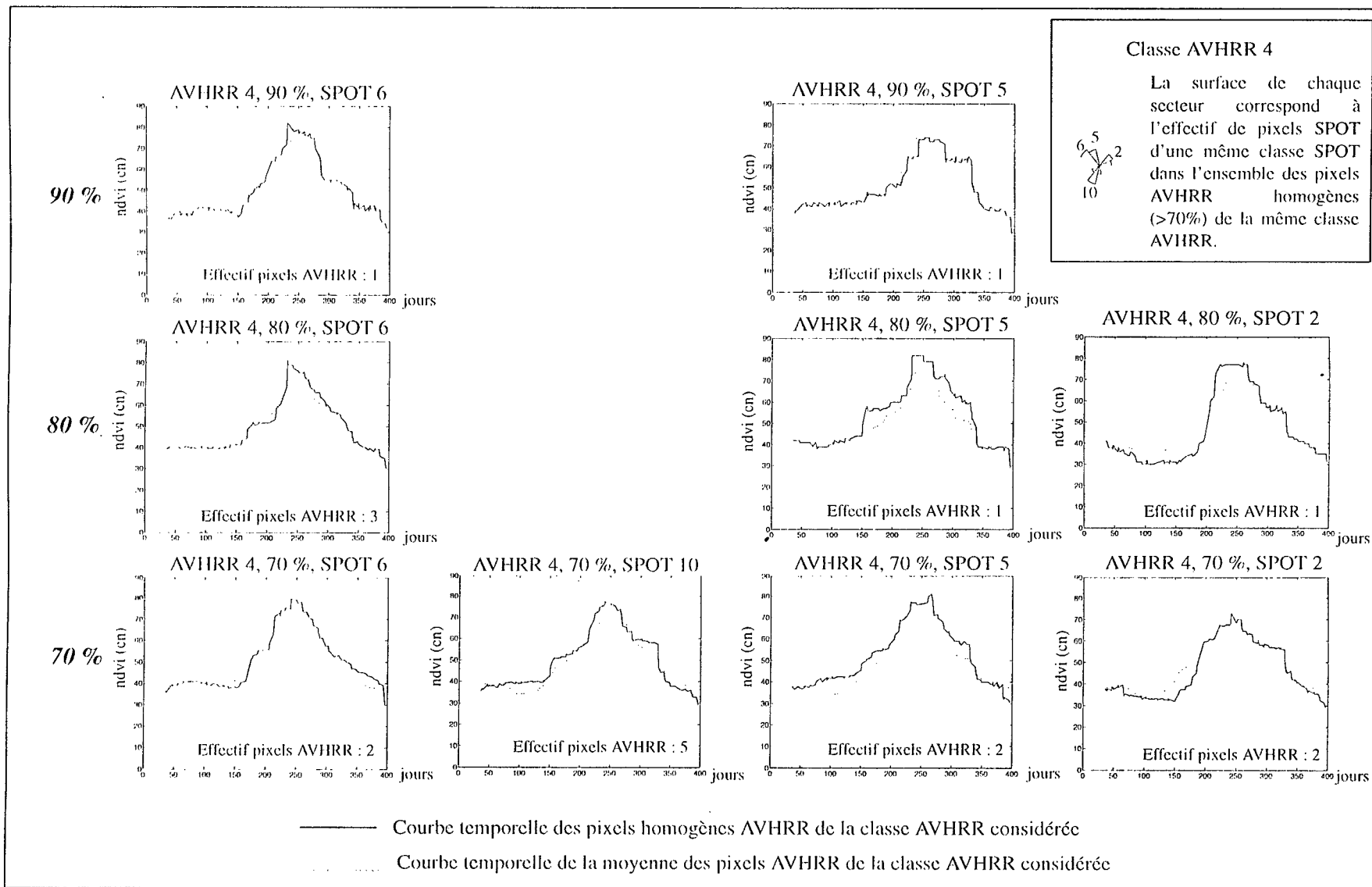


Figure 2-19, Classe AVHRR 9 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.

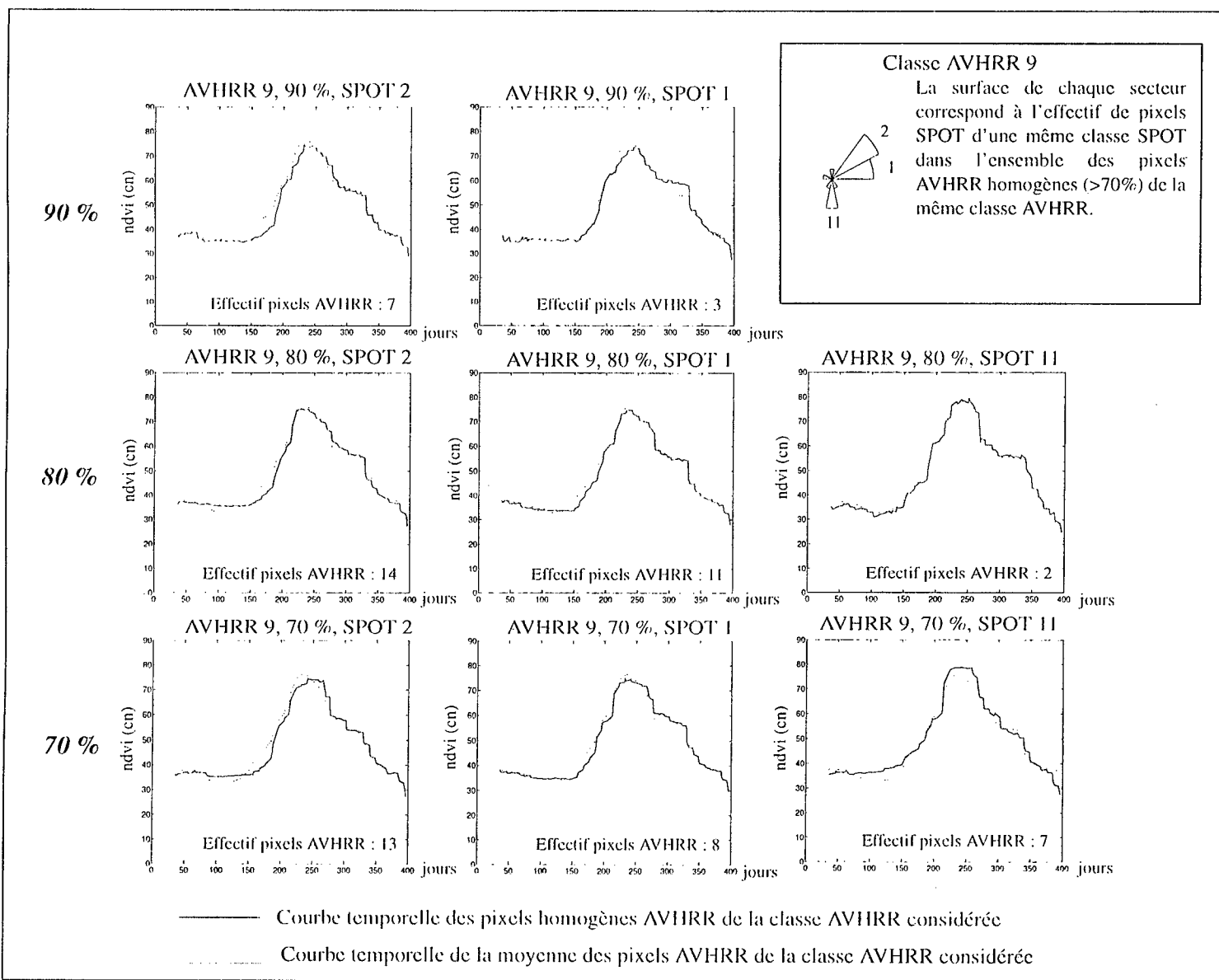
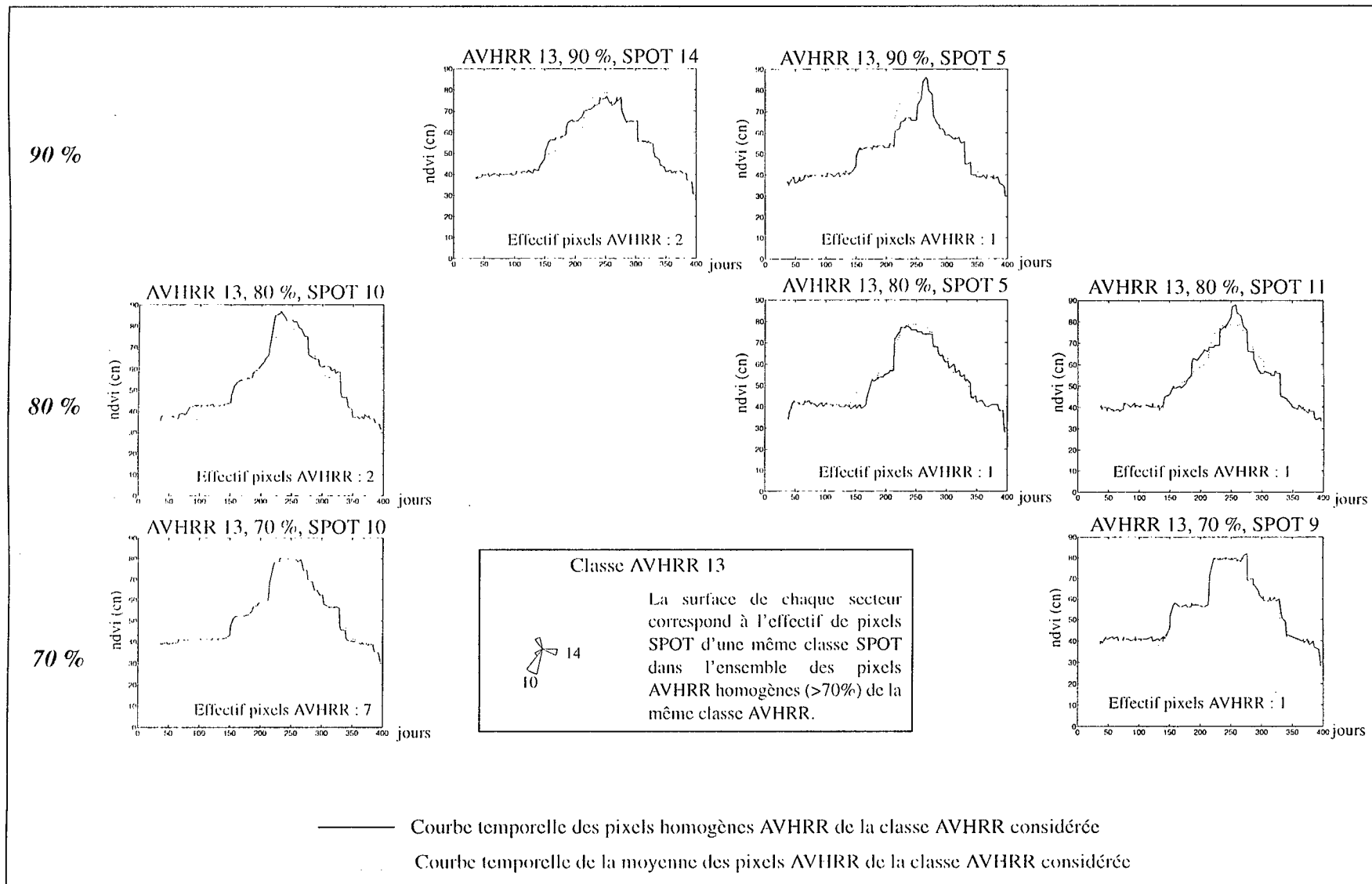


Figure 2-20, Classe AVHRR 13 : comportement temporel des pixels AVHRR homogènes selon leur degré d'homogénéité.



AVHRR homogène dans l'une des trois catégories d'homogénéité définies précédemment (Figure 2-15, 2-16, 2-17, 2-18, 2-19 et 2-20).

2.4.2.4 Analyse comparée du comportement temporel des classes AVHRR et des pixels AVHRR homogènes

Cette analyse du comportement temporel est construite sur la base d'une comparaison entre les courbes définies ci-dessus et la courbe caractéristique de chacune des classes AVHRR, tous pixels confondus. Un certain nombre d'observations générales peuvent être dégagées :

* Dans chacune des classes, la courbe établie à partir des pixels homogènes a tendance à se rapprocher de la courbe générale de la classe (en pointillé) :

- d'une part, avec l'amélioration de l'homogénéité des pixels (de 70% à 90%).
- d'autre part, avec l'augmentation de l'effectif de pixels homogènes, quel que soit leur pourcentage d'homogénéité.

* Les courbes présentent toutes des caractéristiques communes :

- schéma général ternaire :
 - montée du signal au début de la saison humide (vers jour julien 200)
 - phase plus ou moins courte de "maturité" (plateau au sommet)
 - sénescence et chute du signal à partir du jour julien 270.
- Le secteur de courbe correspondant à la chute du signal présente presque toujours, dans toutes les classes, un plateau intermédiaire, situé vers le jour julien 340 et marquant ainsi deux paliers successifs. Cette rémission dans la chute du signal marque peut être l'influence d'une reprise relative de l'activité chlorophyllienne ou du moins une stabilité temporaire, liée aux dernières pluies d'arrière saison (figure 2.6)

- la présence d'un "creux" en fin de saison sèche sur l'ensemble des courbes de moyenne de classe AVHRR. Ce creux n'apparaît pas systématiquement sur les courbes des pixels homogènes.

- A la différence de la stabilité de la courbe des moyennes de classe AVHRR, la courbe des pixels homogènes présente pour les dernières mesures une chute sensible du NDVI. Cet artefact provient probablement d'un réglage sur la fenêtre glissante de BISE.

2.4.2.5 Analyse du comportement temporel des classes AVHRR et de la moyenne des classes AVHRR

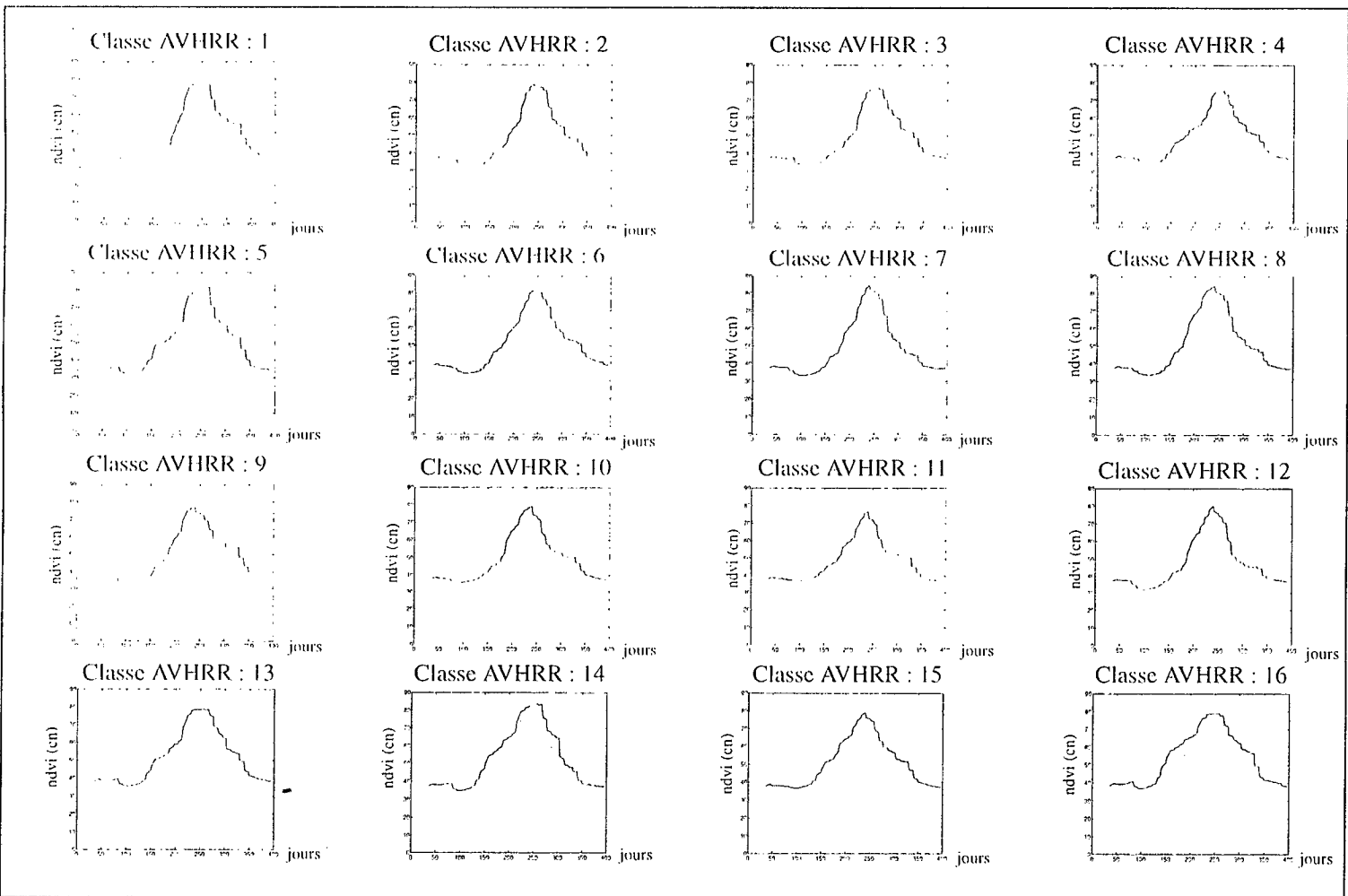
Plusieurs familles de courbes peuvent être sommairement distinguées en première analyse de la figure 2-21 :

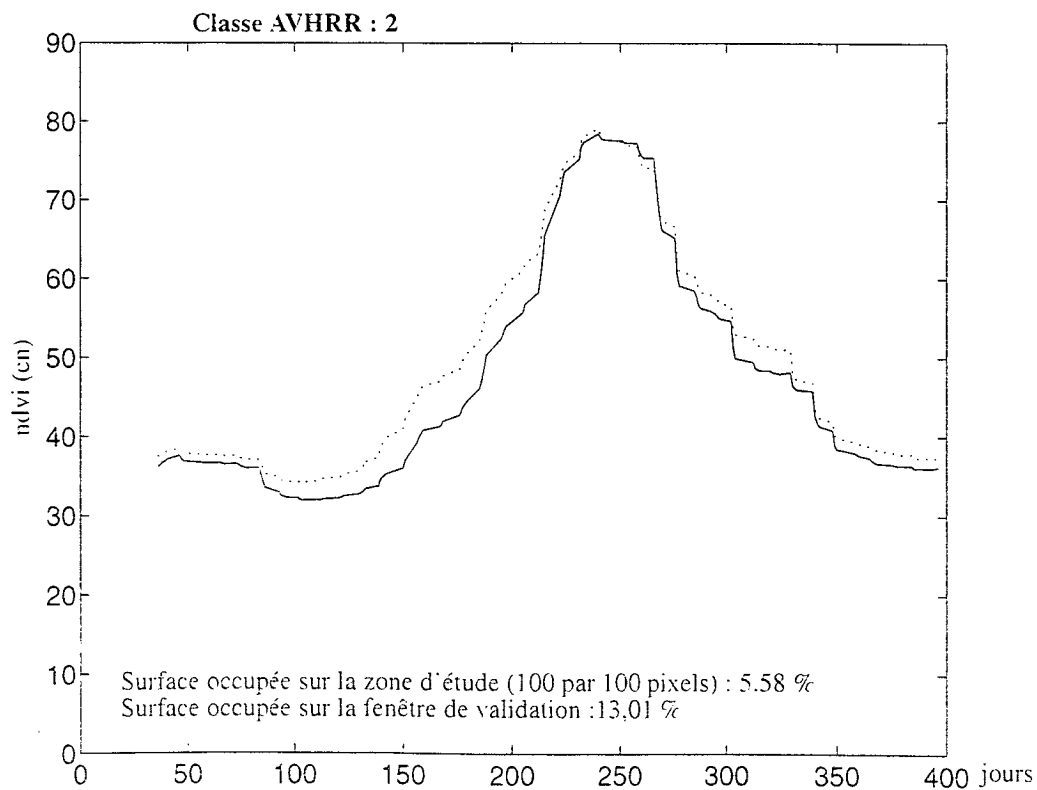
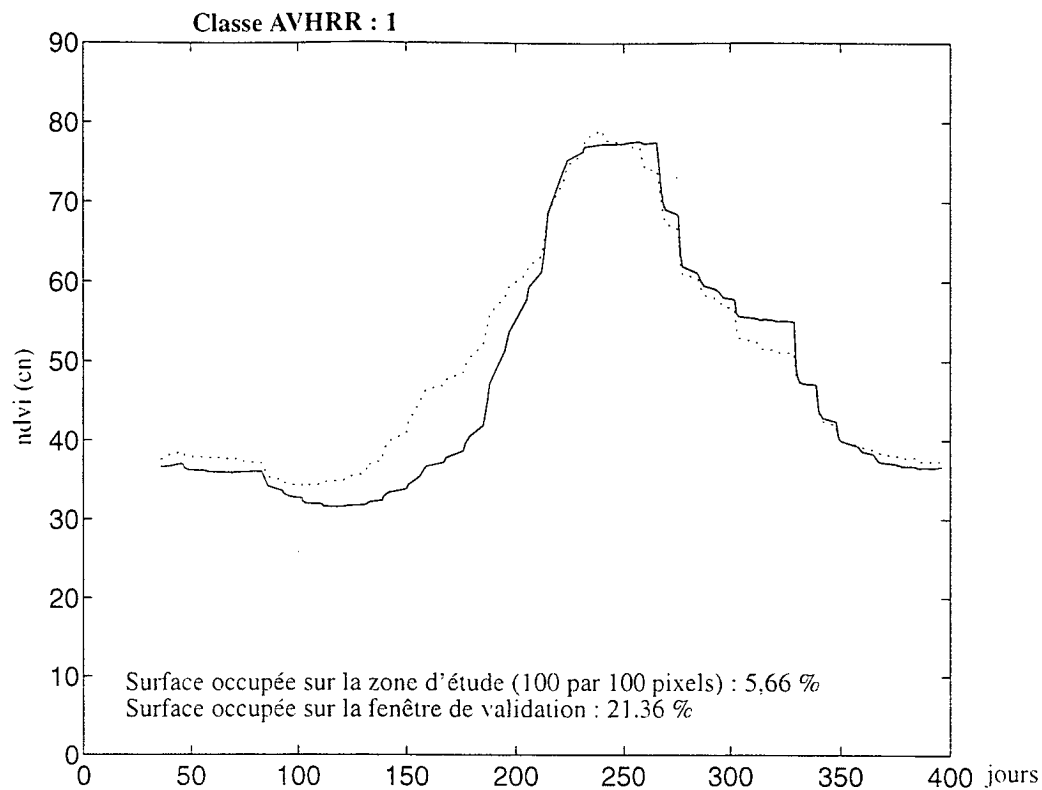
* une première famille regroupe les courbes des classes AVHRR 1, 2 et 9. Les courbes y sont relativement bien ajustées au profil "moyen" de la classe (en pointillé). La montée du signal s'effectue brusquement, sans transition et selon une pente accentuée qui s'achève par un plateau de maturité bien marqué, moins net toutefois pour la classe 9. Les classes SPOT dominantes correspondantes 1 et 2 sont celles de savanes parcs à faible pourcentage de ligneux, où dominent les formations herbeuses et les cultures. La brusque montée du signal en début de saison humide peut ainsi s'expliquer par le démarrage rapide de la biomasse herbacée et le recouvrement accéléré du sol. En outre, dans ces classes où les surfaces cultivées sont étendues, le plateau sommital pourrait correspondre à une phase stable de feuillaison maximale des cultures (coton et mil).

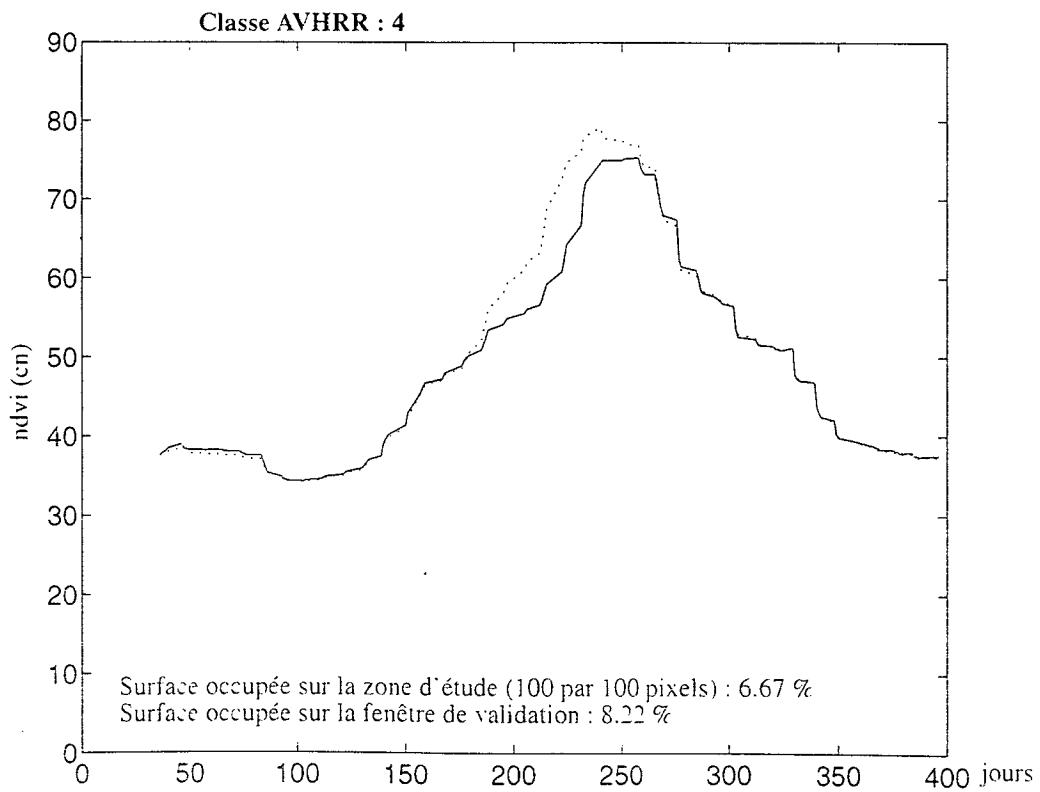
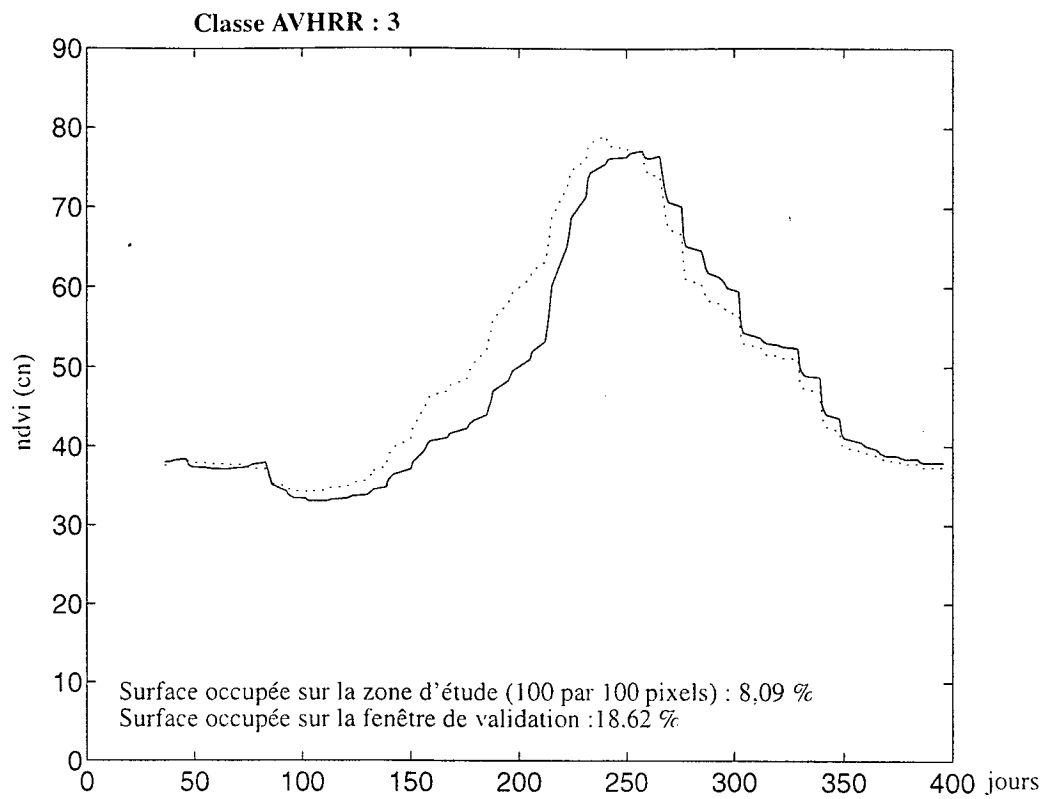
* les classes 7 et 12 présentent des caractères proches, exception faite du plateau sommital, absent ici.

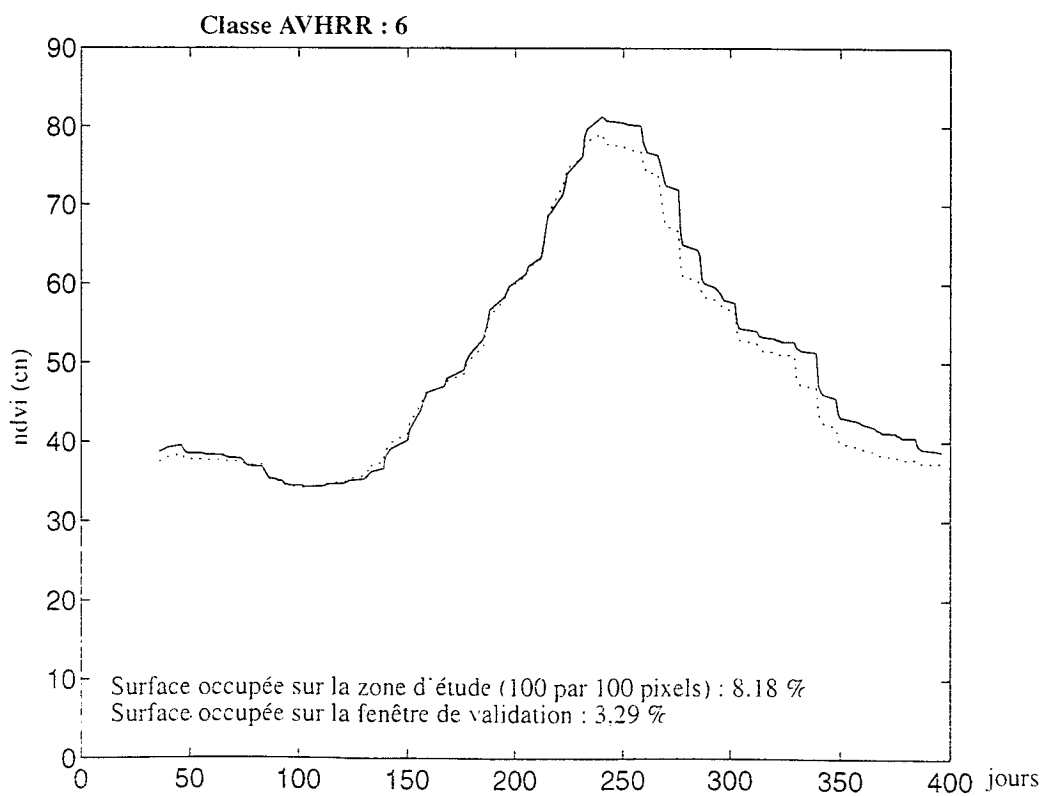
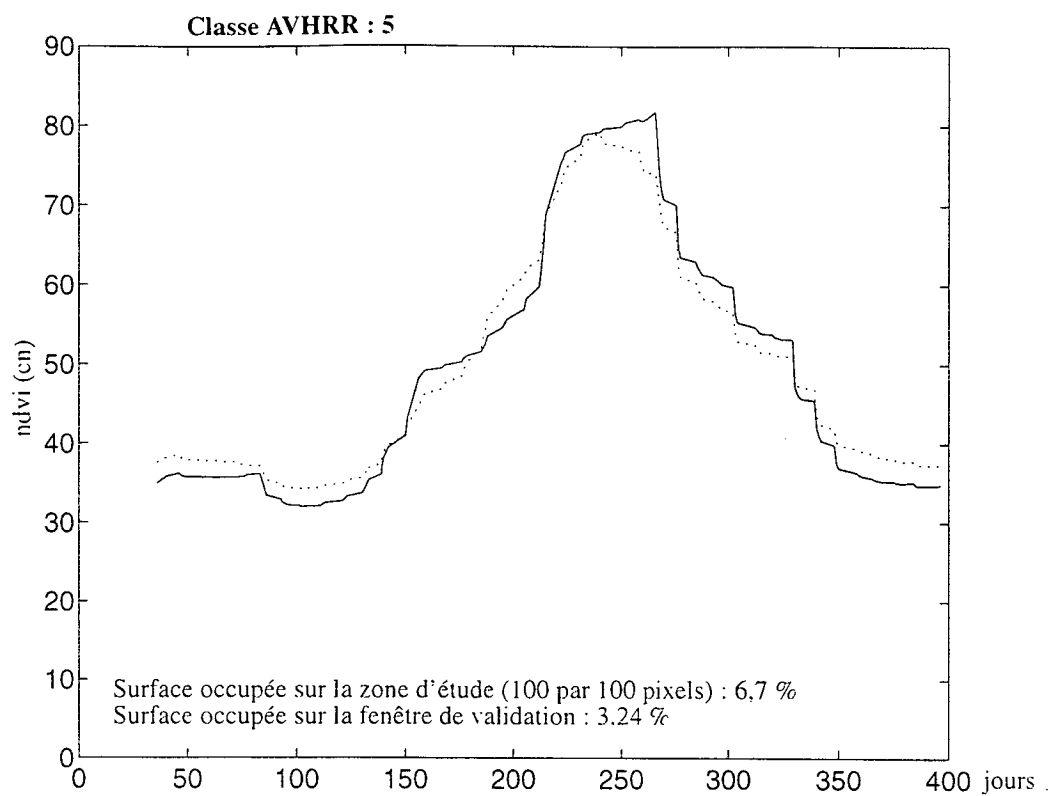
* les courbes du type de celles des classes AVHRR 4, 13 ou 16 ont une allure générale assez sensiblement différente des précédentes. Le profil est plus chaotique, plus accidenté. Ces courbes sont surtout marquées par deux caractères majeurs :

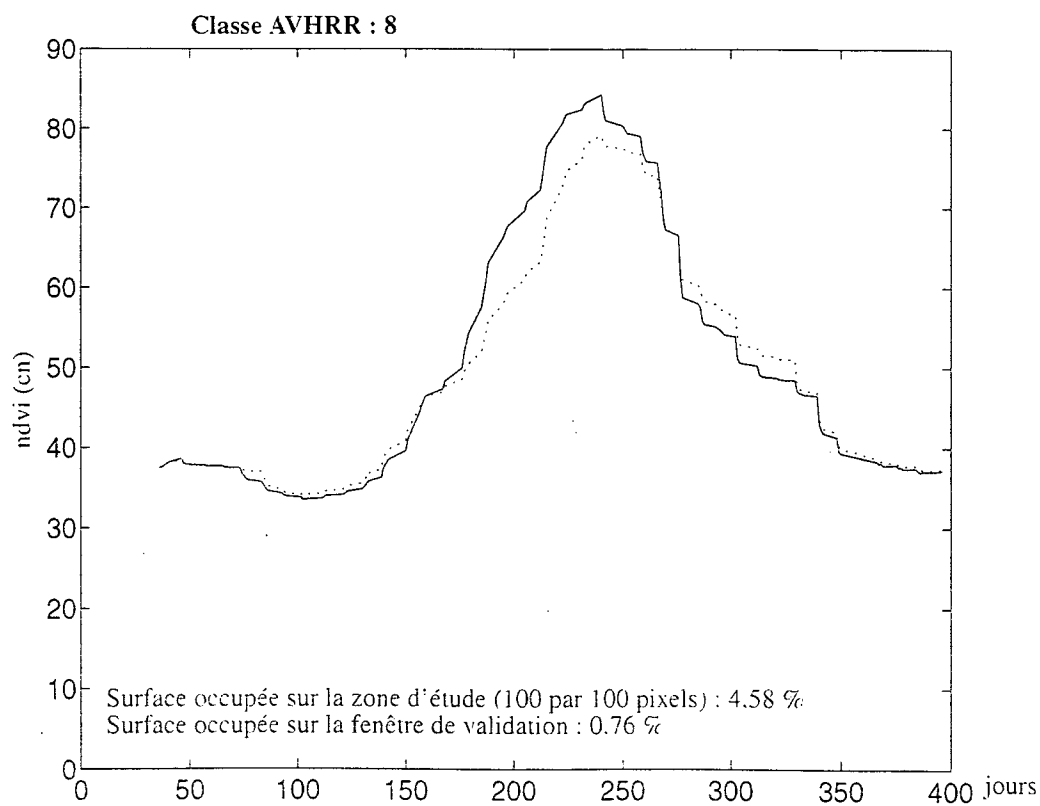
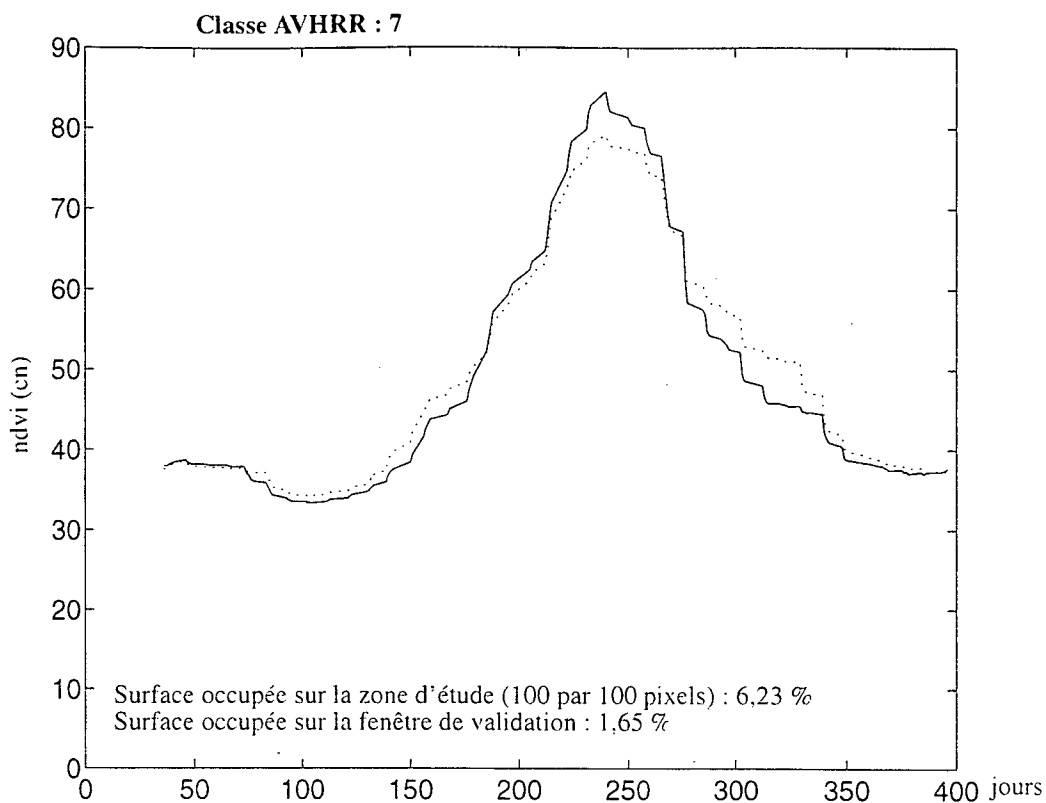
Figure 2-21, Courbes temporelles NDVI des classes AVHRR (trait plein). La moyenne de l'ensemble des classes AVHRR est figurée en pointillé. Dans les huit pages suivantes un zoom de chaque classe permet une meilleure lecture des différentes courbes.

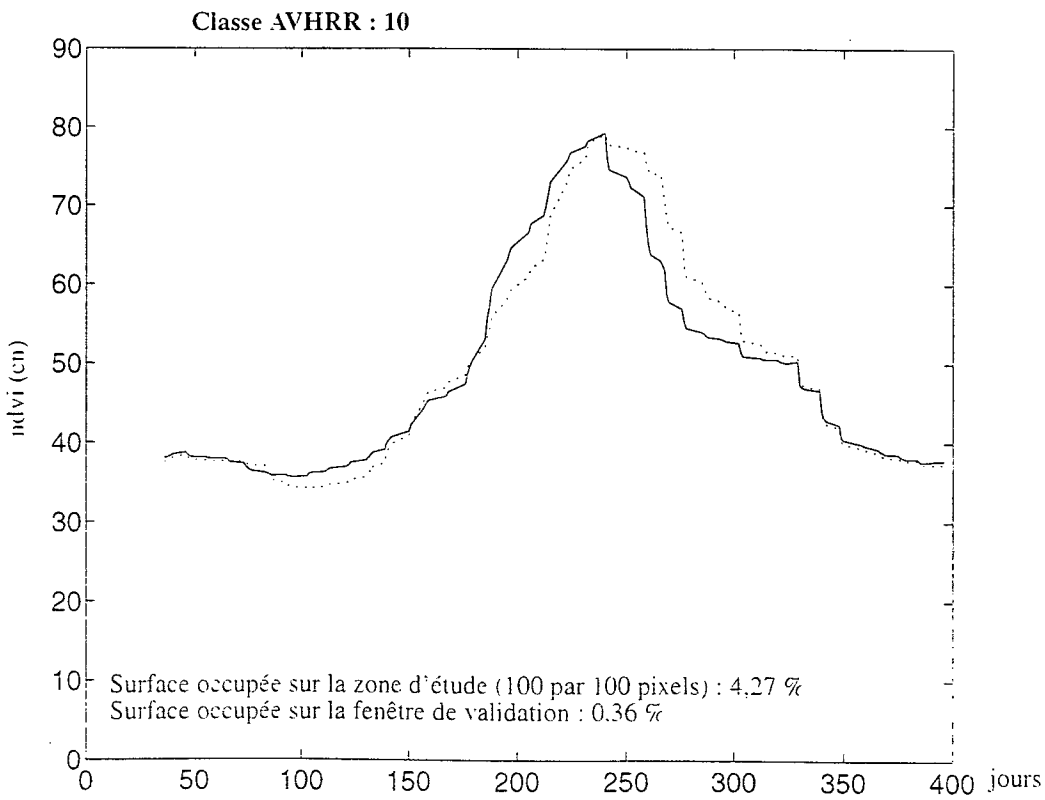
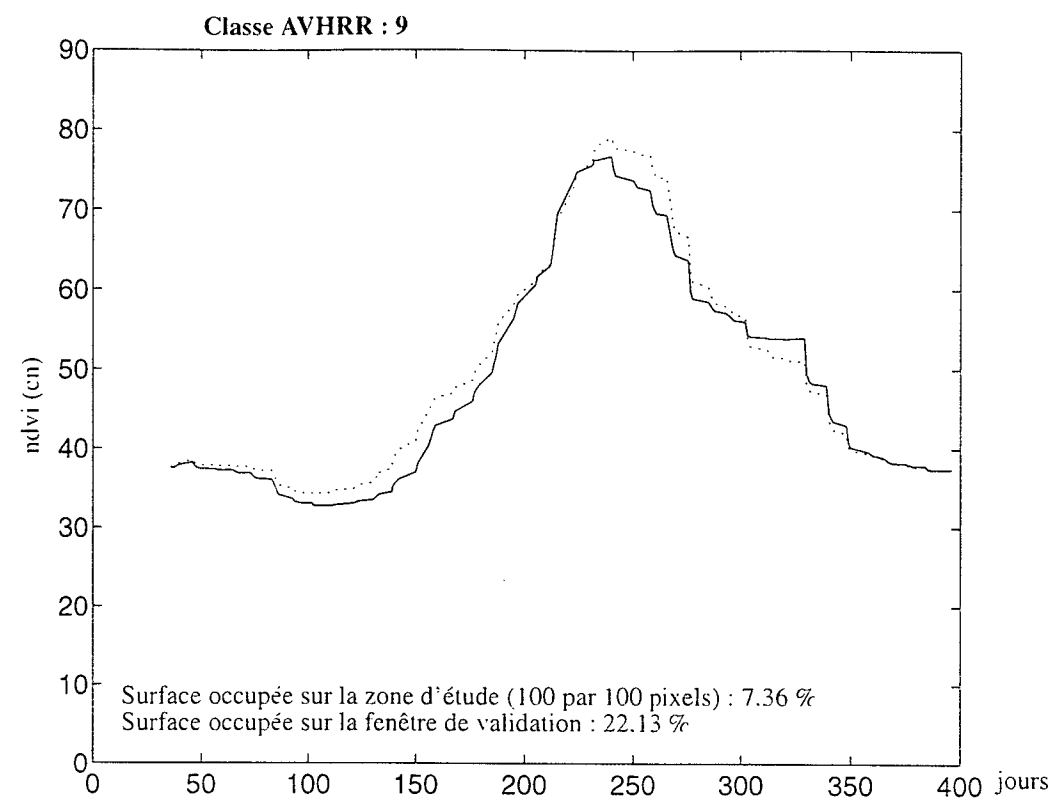


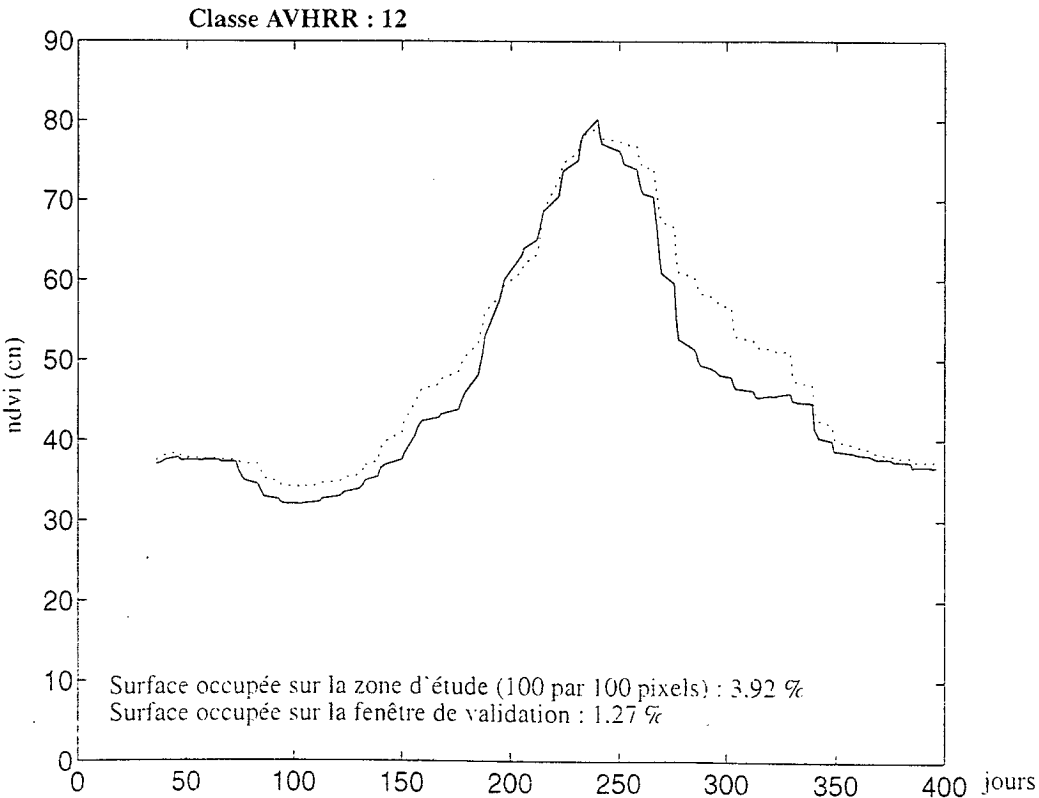
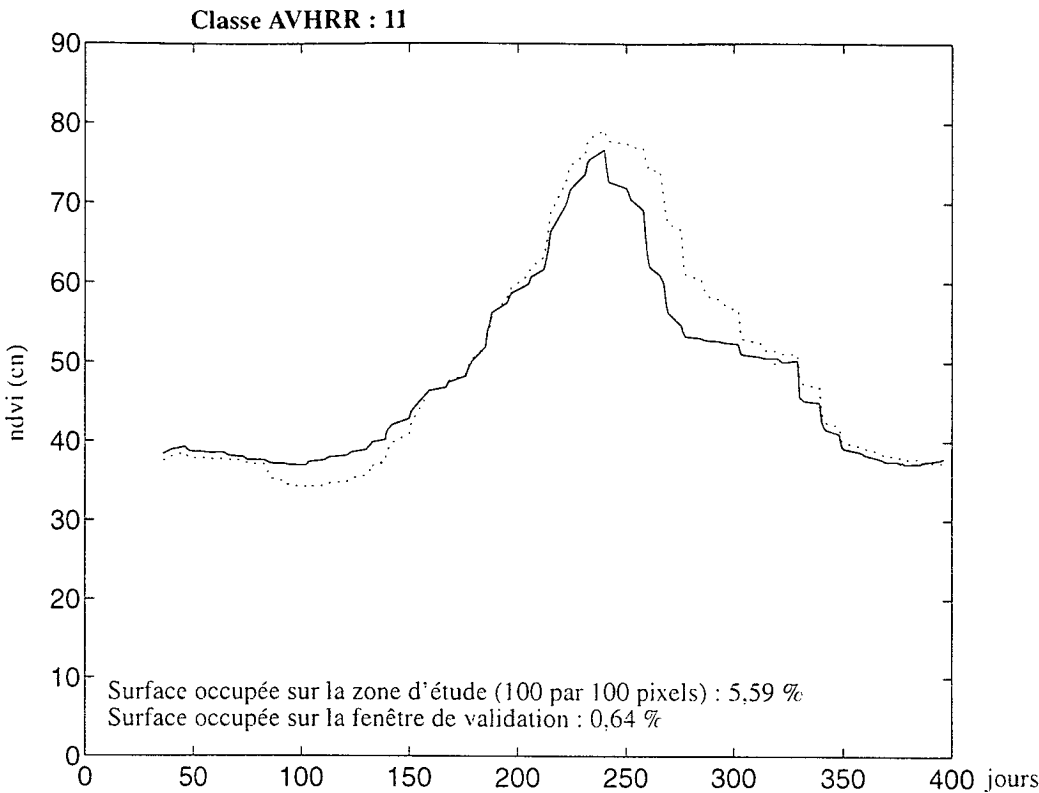


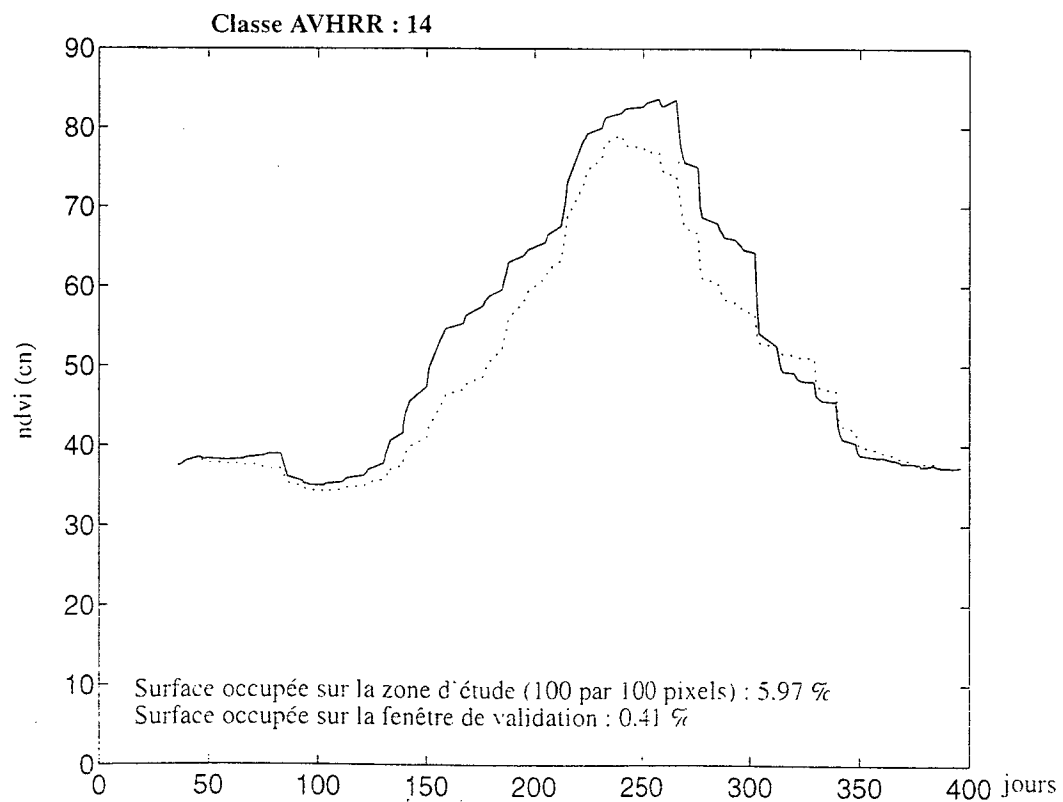
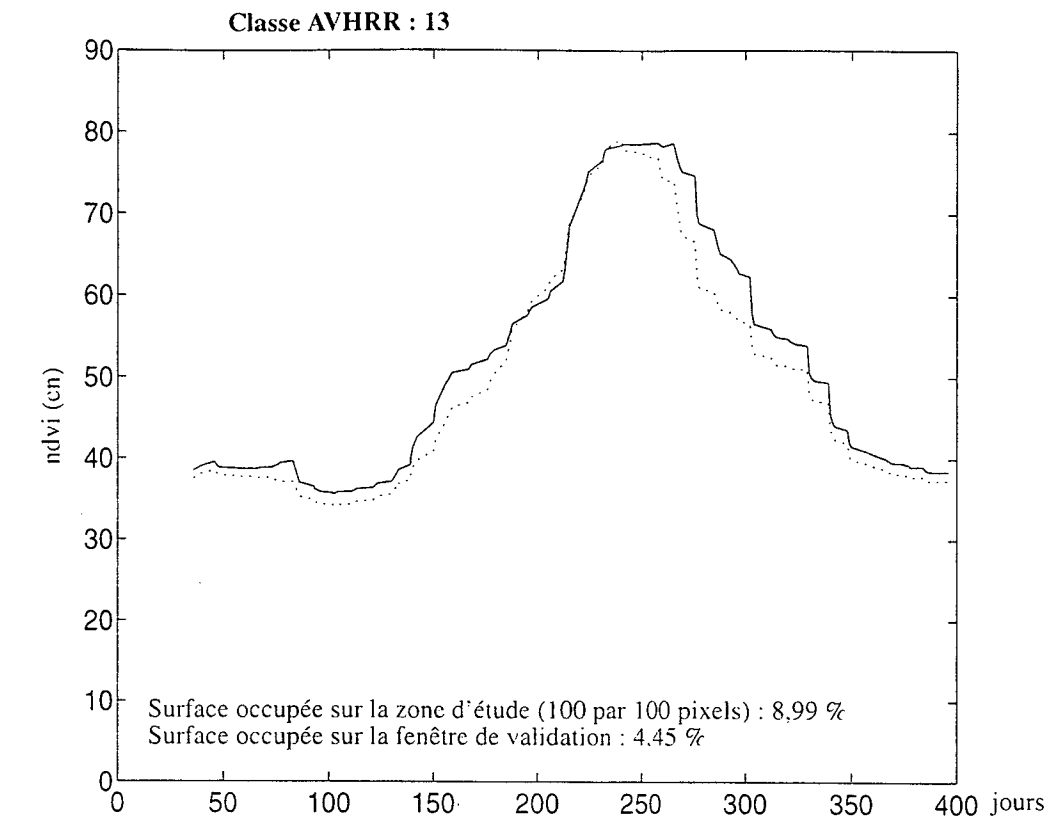


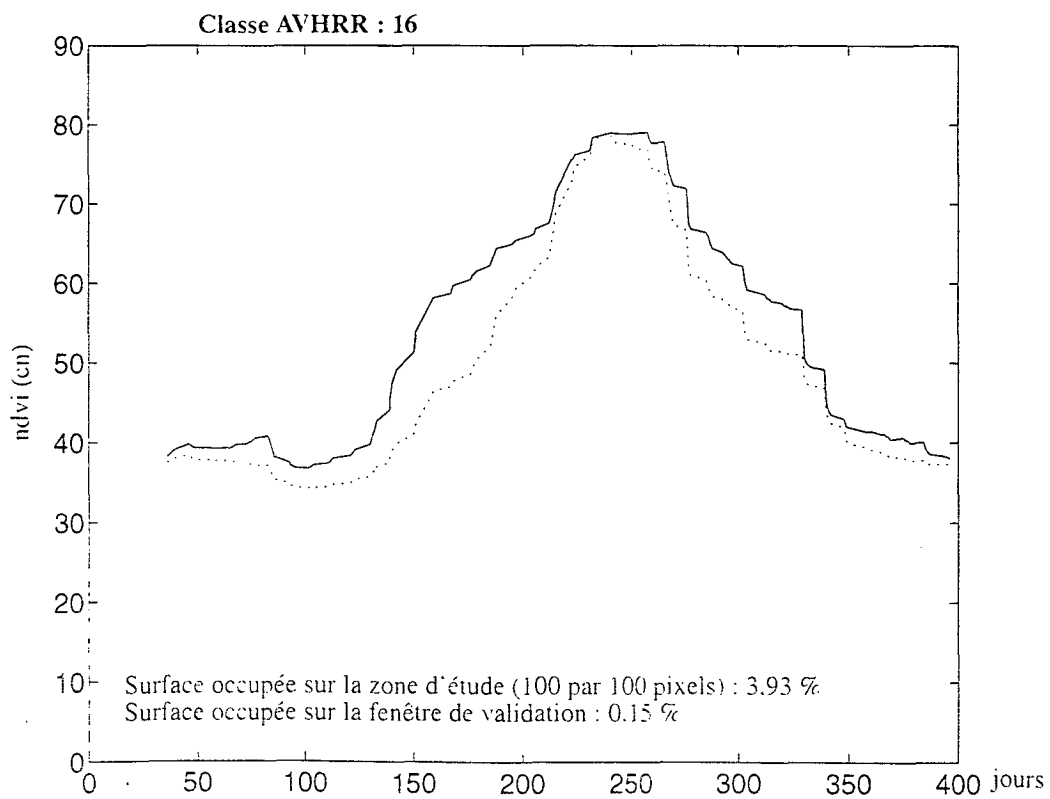
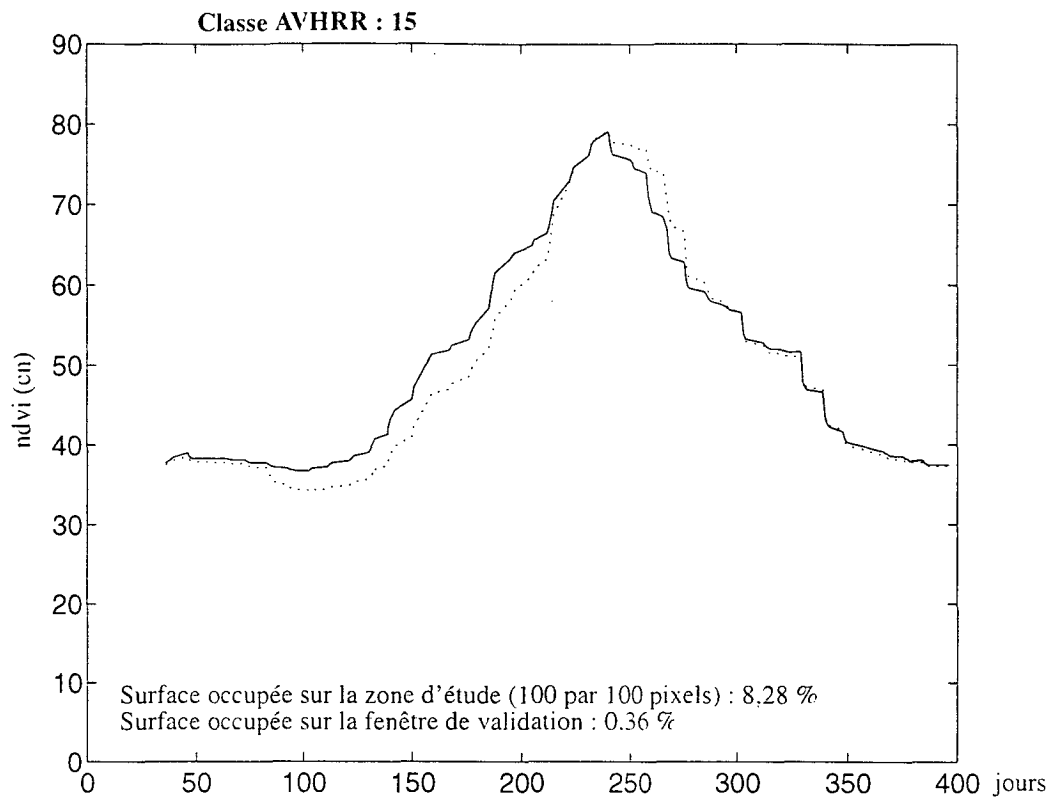












- une montée du signal NDVI par paliers, en deux épisodes principaux le plus souvent.
- une date précoce (jour julien 150, au lieu du jour julien 200 pour les groupes précédents) du début de phase de croissance.

Le taux de boisement élevé (50 à 75 % et plus) des classes SPOT 10 et 14 correspondantes, suggère une influence possible de la biomasse ligneuse sur ces deux caractéristiques majeures. On pourrait évoquer le rôle des premières pluies de mai (jour julien 120 à 150) sur la feuillaison de certaines espèces arborées recouvrant les secteurs du plateau oriental et ses bordures. Par ailleurs, on ne peut pas totalement exclure l'influence de la localisation des espaces dominés par les classes SPOT 10 et 14, au sud-est de la zone : il existe en effet un léger gradient pluviométrique nord-sud, déterminant peut-être une certaine précocité dans cette partie du site, qui pourrait être quelque peu amplifié par la topographie de plateau de ce secteur.

Enfin, on pourrait interpréter les profils de ce groupe de savanes boisées comme résultant de la superposition de deux courbes : l'une, propre aux couverts ligneux, démarrant plus tôt mais atteignant des valeurs modérées de NDVI ; l'autre, caractéristique du couvert herbacé, à départ plus tardif et à pic de NDVI beaucoup plus marqué.

2-5 ANALYSE DES PARAMETRES PHENOLOGIQUES DES COURBES TEMPORELLES NDVI DES CLASSES AVHRR

Dans cette seconde phase, l'analyse du comportement de chaque classe AVHRR sera menée à partir de l'ensemble des courbes temporelles représentées dans la Figure 2-21, qui regroupe toutes les classes AVHRR ainsi que la moyenne de ces classes. Pour caractériser la morphologie de ces différentes courbes, on a défini un certain nombre de paramètres mesurables, traduisant la phénologie des couverts de surface.

variabilité
interannuelle

2.5.1 Définition des paramètres phénologiques

S'agissant de milieux appartenant à un même domaine biogéographique ou bioclimatique, il n'est pas surprenant que les courbes temporelles des moyennes de NDVI montrent une grande analogie entre les profils. Malgré cette similitude, il est cependant possible de dégager un certain nombre d'éléments qui permettent de distinguer quelques familles de comportements temporels. Ces éléments correspondent à des caractéristiques apparaissant comme déterminantes du point de vue phénologique :

- date de début de cycle d'activité chlorophyllienne.
- longueur de la période de croissance et d'augmentation en biomasse verte, exprimée par la partie ascendante de la courbe NDVI.
- longueur de la période de stabilité - maturité végétale correspondant au "plateau" sommital de ces courbes NDVI, ou d'une période équivalente de maximum d'activité.
- durée de la période de décroissance - sénescence de la biomasse (partie "descendante" de la courbe NDVI).
- durée totale du cycle (croissance, maturité et sénescence).

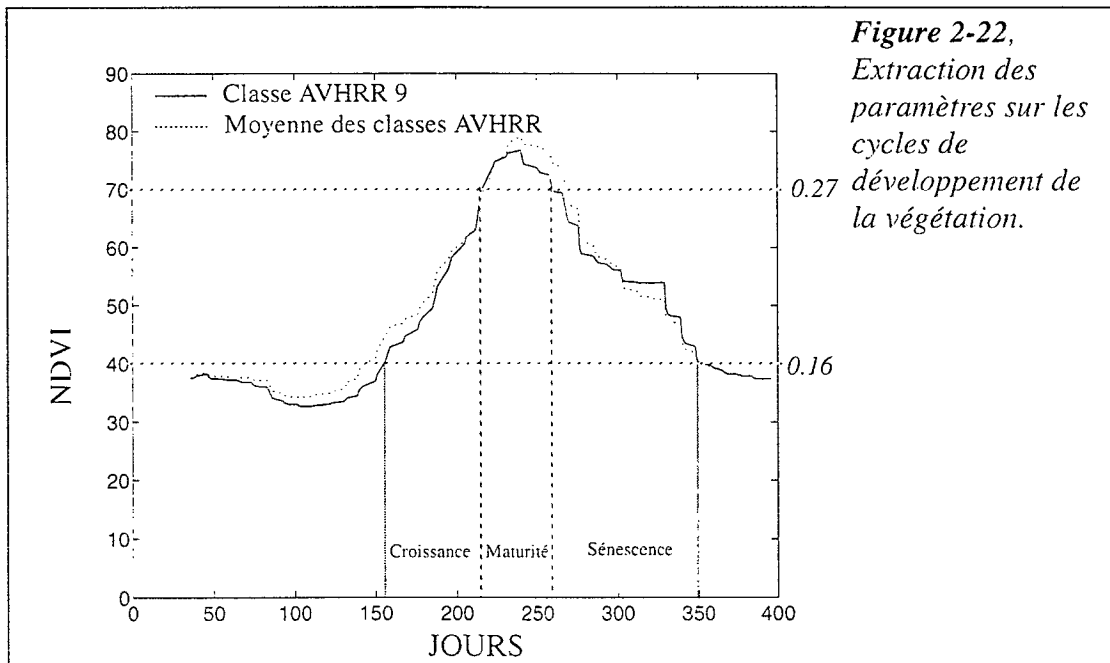
2.5.2 Mesure des paramètres phénologiques

Quel que soit le paramètre phénologique considéré, il convient de définir des bornes appliquées aux courbes de NDVI, qui permettent de déterminer la valeur des paramètres, de façon à mener une analyse comparative à partir de références communes. Pour établir ces bornes, nous nous sommes laissés guider par la forme générale des courbes et les valeurs NDVI correspondantes. Sans nous dissimuler qu'il y a dans cette démarche une part indéniable d'arbitraire, nous pouvons considérer que cette méthode empirique a l'avantage d'être correctement ajustée aux spécificités de la zone d'étude (Figure 2-22).

Pour fixer le début du cycle (départ de la courbe croissante de NDVI) et la fin de la

phase de sénescence, nous avons choisi le seuil minimal de 40 (en compte numérique) soit 0.16 (en NDVI). Le seuil a été fixé de façon à isoler clairement la période finale de saison sèche, avec sa dépression typique entre les jours julien 75 et 140, et de dégager ainsi le départ de l'activité chlorophyllienne. C'est ce même seuil qui a été retenu pour borner la fin de la phase de sénescence et donc de conclusion du cycle croissance, maturité, sénescence.

La durée de la période de croissance et d'augmentation de la biomasse est comprise entre le début du cycle et le début de la phase maximale d'activité (ou de maturité / stabilité). Pour ce dernier, c'est la valeur 70 en compte numérique (0.27 en NDVI) qui a été retenue, toujours à partir des mêmes considérations (valeur qui permet d'isoler nettement le sommet souvent en plateau de la courbe NDVI). C'est cette même valeur qui fixe la fin de la phase d'activité maximale et le début de la phase de sénescence.



La durée de la période de sénescence correspond, évidemment, au nombre de jours compris entre les bornes 70/0.27 et 40/0.16 de la partie descendante de la courbe NDVI.

2.5.3 Résultats de l'analyse des paramètres phénologiques

2.5.3.1 Caractérisation des classes AVHRR par paramètre phénologique : le regroupement des classes AVHRR

Dans le tableau 2-2, les classes AVHRR sont caractérisées par les différents paramètres phénologiques établis précédemment.

Classes AVHRR	1 ^{er} jour d'activité	$\Delta_{\overline{M}}$	Croissance en jours	$\Delta_{\overline{M}}$	Maturité en jours	$\Delta_{\overline{M}}$	Sénescence en jours	$\Delta_{\overline{M}}$	Durée totale du cycle en jours	$\Delta_{\overline{M}}$
1	180	+ 32	40	- 31	52	+ 2	80	- 8	172	- 37
2	160	+ 12	63	- 8	46	- 4	83	- 5	192	- 17
3	160	+ 12	71	0	32	- 18	100	+ 12	203	- 6
4	143	- 5	89	+ 18	37	- 13	83	- 5	209	0
5	146	- 2	71	0	60	+ 10	71	- 17	202	- 7
6	151	- 3	69	- 2	57	+ 7	97	+ 9	223	+ 14
7	151	+ 3	66	- 5	54	+ 4	80	- 8	200	- 9
8	149	+ 1	57	- 14	63	+ 13	83	- 5	203	- 6
9	157	+ 9	60	- 11	43	- 7	97	+ 9	200	- 9
10	143	- 5	74	+ 3	43	- 7	97	+ 9	214	+ 5
11	134	- 14	89	+ 18	32	- 18	97	+ 9	218	+ 9
12	157	+ 9	66	- 5	46	- 4	83	- 5	195	- 14
13	140	- 8	77	+ 6	60	+ 10	91	+ 3	228	+ 19
14	134	- 14	83	+ 12	63	+ 13	71	- 17	217	+ 8
15	131	- 17	83	+12	46	- 4	97	+ 9	226	+ 17
16	131	- 17	86	+15	60	+ 10	103	+ 15	249	+ 40
Moyenne	148		71		50		88		209	

Tableau 2-2, Valeur des paramètres phénologiques des classes AVHRR.

2.5.3.2 Hiérarchisation des classes AVHRR selon chaque paramètre phénologique

Pour chacun des paramètres phénologiques, les classes AVHRR ont été rangées par valeur croissante comme le montre le tableau 2-3.

paramètres phénologiques	Hiérarchisation des classes AVHRR
1 ^o jour d'activité (précocité)	1, [2,3] ^a , [9,12], [6,7], 8, M ^b , 5, [4,10], 13, [11,14], [15,16]
croissance (durée, ordre croissant)	1, 8, 9, 2, [7, 12], 6, M, [3, 5], 10, 13, [14, 15], 16, [4, 11]
maturité (durée, ordre croissant)	[3, 11], 4, [9, 10], [2, 12, 15], M, 1, 7, 6, [5, 13, 16], [8, 14]
sénescence (durée, ordre croissant)	[5, 14], [1, 7], [2, 4, 8, 12], M, 13, [6, 9, 10, 11, 15], 3, 16
durée totale du cycle (ordre croissant)	1, 2, 12, [7, 9], 5, [3, 8], M, 4, 10, 14, 11, 6, 15, 13, 16

a. classes ex aequo.

b. Moyenne.

Tableau 2-3, Hiérarchisation des classes AVHRR en fonction des paramètres phénologiques

A partir de ce tableau, on peut déjà formuler quelques observations préliminaires quant aux regroupements qui apparaissent.

- L'ensemble des classes 11 à 16 (sauf la 12) précoces, s'oppose clairement à l'ensemble 1 à 9, beaucoup plus tardif.

- De même, cet ensemble des classes 11 à 16 témoigne d'une longue durée de la période de montée du signal (croissance) qui s'oppose nettement aux autres classes.

- A l'exception de l'interversion entre la classe 5 et la classe 3, très proches, les regroupements proposés par le paramètre durée totale du cycle, sont redondants avec ceux du

paramètre premier jour d'activité. Cette redondance s'explique facilement, puisque la précocité du départ du cycle constitue le facteur prépondérant de la durée totale du cycle.

2.5.3.3 Hiérarchisation des classes AVHRR selon la combinaison des paramètres phénologiques.

Pour combiner les paramètres phénologiques, on procède de la façon suivante :

- pour chaque paramètre, on établit une série numérique continue de 16 à 1 (équivalent au nombre de classes AVHRR), en affectant à chaque classe AVHRR une valeur proportionnelle à la place qu'elle occupe dans la hiérarchie du paramètre phénologique en cours de traitement, telle qu'elle a été définie au paragraphe précédent.

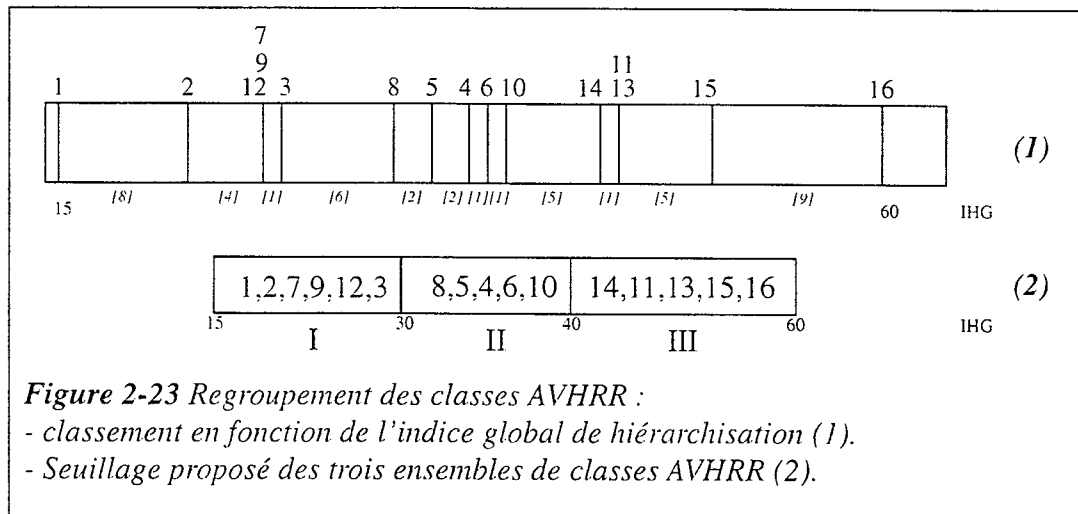
- le total correspond à la somme des valeurs affectées à chaque classe, qui définit ainsi un indice de hiérarchisation globale (IHG) qui exprime la combinaison multi-paramétrique des classes AVHRR (tableau 2-4). Cet indice s'étale entre 15 et 60. Dans ce calcul, le paramètre durée totale du cycle, redondant avec la précocité, n'est pas pris en compte.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Précocité	1	3	3	11	9	7	7	8	5	11	14	5	12	14	16	16
Durée de la croissance	1	4	9	16	9	7	6	2	3	10	16	6	11	13	13	14
Durée de la maturité	9	8	2	3	14	11	10	16	5	5	2	8	14	16	8	14
Durée de la sénescence	4	8	15	8	2	14	4	8	14	14	14	8	9	2	14	16
Durée totale du cycle	1	2	8	9	6	13	5	8	5	10	12	3	15	11	14	16
Total (indice de hiérarchisation globale. IHG)	15	23	28	38	36	39	27	34	27	40	46	27	46	45	51	60

Tableau 2-4, Hiérarchisation des 16 classes AVHRR en fonction des paramètres phénologiques.

2.5.3.4 Regroupement des classes AVHRR selon l'indice de hiérarchisation globale

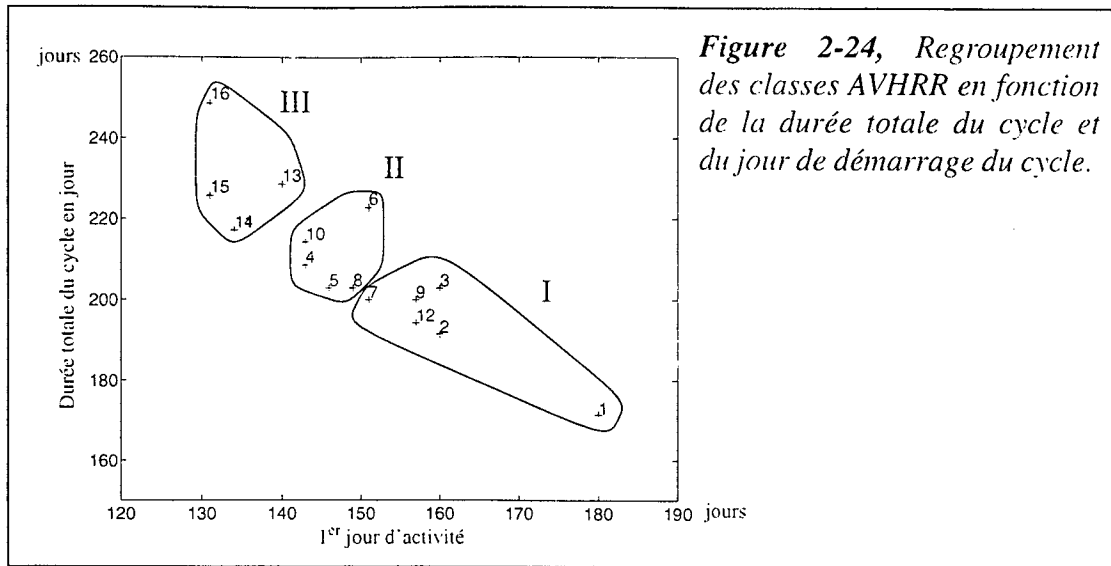
Le tableau 2-4 et la figure 2-23 permettent de distinguer trois ensembles majeurs de classes AVHRR selon la combinaison de paramètres phénologiques choisis. Les valeurs 30 et 40 de l'indice de hiérarchisation globale ont été retenues comme limites entre ces ensembles. Elles correspondent à des écarts relativement plus importants (5 et 6) entre deux classes successives (classes 3 et 8; classes 10 et 14). Les classes extrêmes 1 et 16, malgré leur écart important avec les classes voisines n'ont pas été isolées.



2.5.3.5 Regroupement des classes AVHRR dans l'espace bidimensionnel des paramètres phénologiques.

Une approche complémentaire permet de mettre en évidence les grands ensembles de classes AVHRR, par représentation graphique bidimensionnelle des couples de paramètres phénologiques. Trois modalités principales de couplage ont été testées :

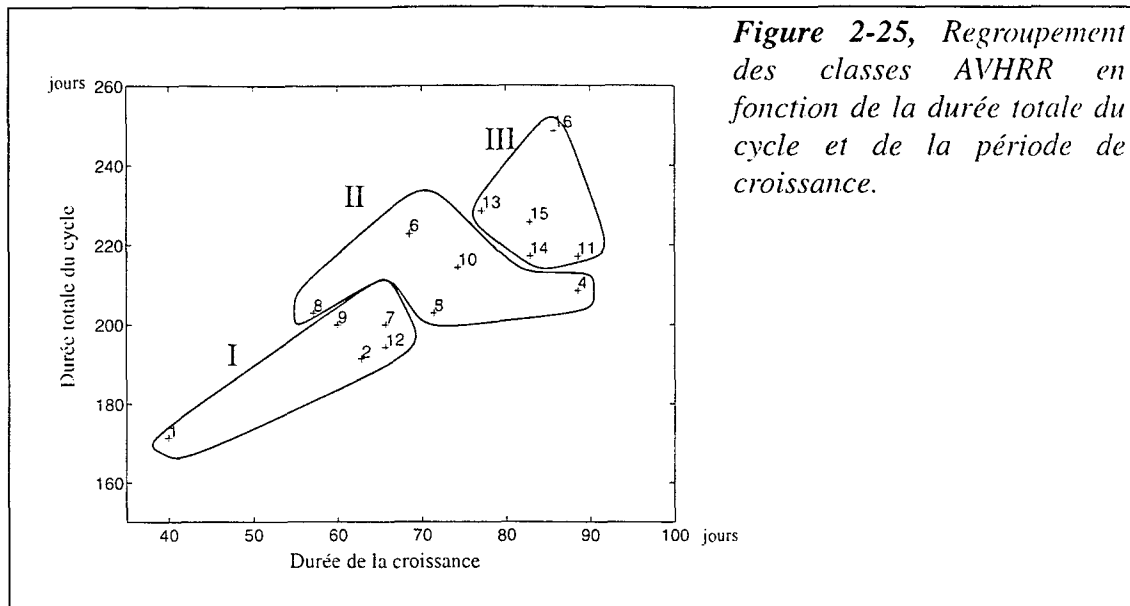
- couplage premier jour d'activité / durée totale du cycle (figure 2-24).



* L'allongement du nuage de point traduit le degré relativement élevé de corrélation entre les deux paramètres, observation déjà relevée dans les pages précédentes.

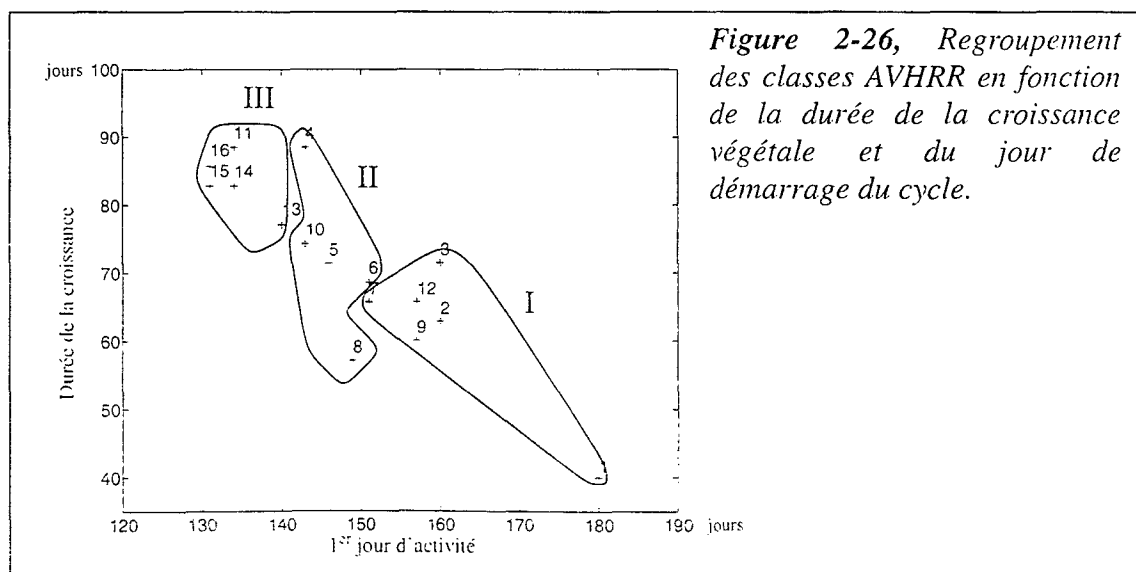
* Les trois ensembles de classes précédemment distingués, se retrouvent clairement regroupés. L'ensemble le mieux individualisé est le 3^{ème} groupe, situé en haut à gauche. Dans le 1^{er} ensemble, en bas à droite, la classe 1 reste éloignée du groupe principal. Les ensembles I et II sont moins nettement discriminés, les classes 7 et 8 assurant la transition entre les deux ensembles.

- couplage durée de la période de croissance / durée totale du cycle (figure 2-25)



Dans ce graphe, l'appartenance de la classe 7 au 1^{er} ensemble apparaît plus clairement, mais la classe 3 se confond avec la classe 5, et la classe 8 (deuxième groupe) reste en marge à proximité de la classe 9. De même, la classe 4 de l'ensemble II, reste quelque peu excentrée.

- couplage premier jour d'activité / durée de la période de croissance (figure 2-26)



Dans ce graphe la classe 8 (ensemble II) reste isolée, tout comme la classe 4 dans le même ensemble. En revanche les ensembles I et III apparaissent bien définis.

2.5.3.6 Conclusion

Les 16 classes issues de la classification par nuées dynamiques ont été analysées à partir de leur comportement temporel exprimé par les courbes du signal NDVI. Sur la base d'un certain nombre de paramètres phénologiques tirés de l'analyse de ces courbes, il a été possible de définir trois ensembles majeurs de classes AVHRR. A quelques chevauchements près, ces trois grands ensembles paraissent correspondre à des entités relativement stables, quelle que soit la combinaison de paramètres qui les définit.

Ces trois ensembles se caractérisent de la façon suivante :

- le 1^{er} ensemble à cycle court (inférieur à 203 jours) et à départ tardif de la phase de croissance (au-delà du 151^{ème} jour), rapide montée régulière en végétation (durée de la période de croissance inférieure à 71 jours).
- le 3^{ème} ensemble, à cycle long (supérieur à 217 jours) et à démarrage précoce (avant le jour 140) et à phase de croissance en plusieurs paliers et relativement longue (supérieure à 77 jours).
- le 2^{ème} ensemble plus hétérogène, à durée du cycle et à précocité intermédiaires (durée comprise entre 202 et 223 jour ; démarrage du cycle entre le 143^{ème} et le 151^{ème} jour) ainsi qu'à phase de croissance variable (rapide ou en palier, à durée plus ou moins longue).

Il s'agit désormais d'examiner la distribution spatiale et la signification thématique de ces ensembles.

2.5.4 Spatialisation, interprétation et signification des grands ensembles de classes AVHRR

2.5.4.1 Interprétation de l'image des grands ensembles de la fenêtre de Bondoukouy

La figure 2-27-A représente la distribution spatiale des 16 classes AVHRR sur la fenêtre de validation du site SALT de Bondoukouy. L'interprétation de cette distribution en termes thématiques est, on le sait, extrêmement délicate, en raison de la nature même des données AVHRR.

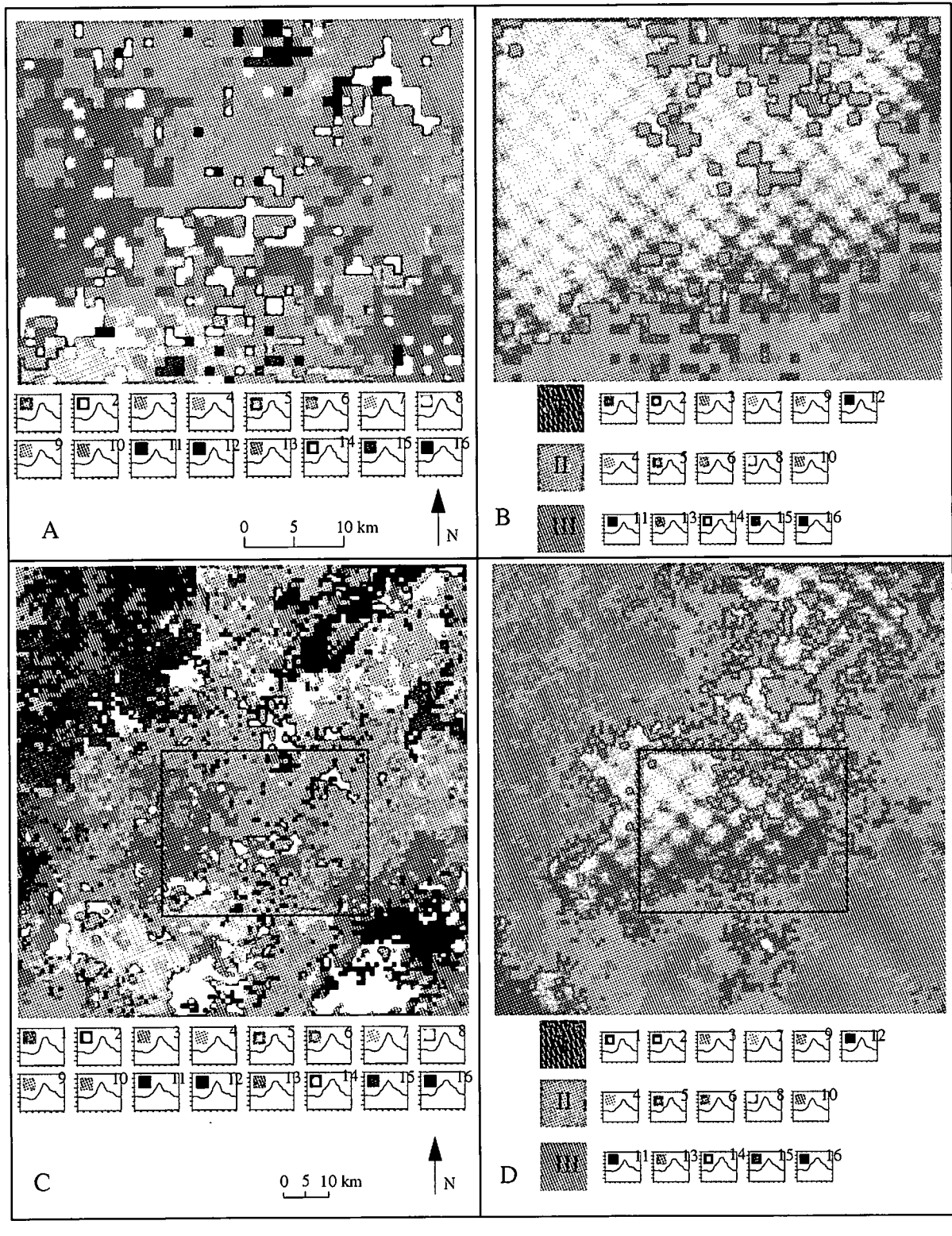
Sur la base des regroupements de classes AVHRR, tels qu'ils ont été effectués ci-dessus, on a produit une image des trois grands ensembles définis précédemment (Figure 2-27-B).

- L'ensemble I occupe la majeure partie de l'espace (78% de la surface de la zone de validation). Rappelons que cet ensemble regroupe les classes AVHRR 1,2,3,7,9 et 12. Comme on l'a vu dans le paragraphe 2.2.3, ces classes correspondent essentiellement aux savanes peu ligneuses des classes SPOT 1 et surtout 2. Elles occupent presque tout l'ensemble de l'image à l'exception du coin sud-est et d'une petite frange méridionale. Ces espaces, à forte occupation humaine, sont pratiquement exclusivement localisés dans la dépression du Mouhoun. La relative brièveté du cycle végétal, le départ tardif de la végétation et la croissance rapide et régulière sont à mettre en rapport avec la prévalence des strates herbacées sur les strates ligneuses (ligneux inférieur à 25% de recouvrement) et l'abondance des cultures (coton, sorgho) à cycle court et à démarrage retardé longtemps après les premières pluies.

*humidité
du sol*

- L'ensemble III contraste nettement avec le précédent. Beaucoup moins étendu (6% de la surface de la zone de validation), concentré essentiellement dans le coin sud-est de l'image, sur le bord du plateau dit de Bondoukouy, il rassemble les classes AVHRR 11, 13, 14, 15 et 16 où dominant les savanes à fort taux de ligneux (supérieur à 50% et parfois à 75%), peu

Figure 2-27. Classes AVHRR et grands ensembles de classes AVHRR à Bondoukou. A et C classification (16 classes) sur la zone de validation (A) et sur le site de Bondoukou (C). En B et D : regroupement des classes en trois ensembles sur la zone de validation (B) et sur le site de Bondoukou (D).

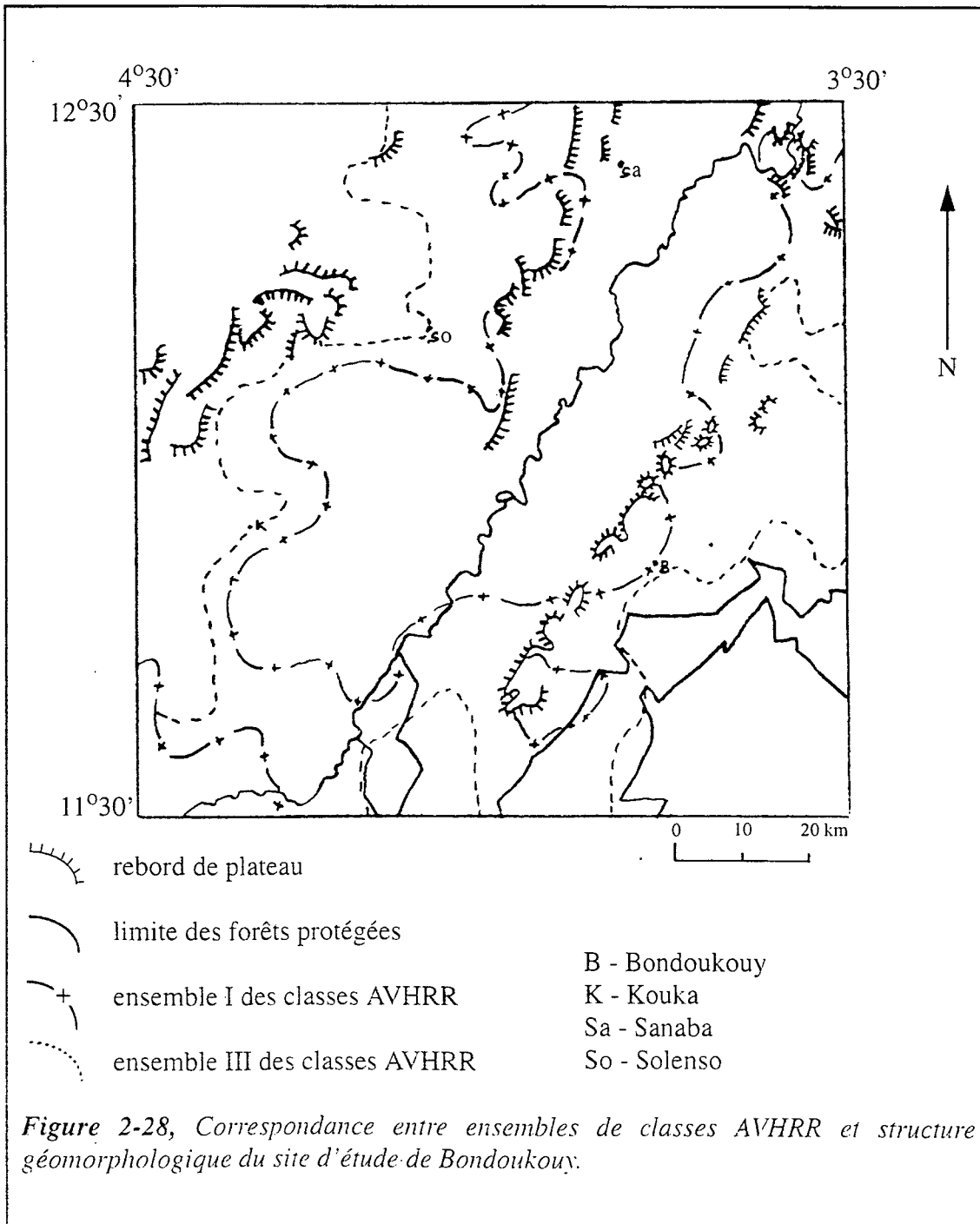


peuplées et peu cultivées. Les caractères phénologiques (démarrage précoce avant les premières pluies, longueur du cycle, phase de croissance plus longue et en paliers), décrivent plutôt le comportement de formations riches en ligneux. Certaines espèces arborées de Bondoukou (*Isoberlinia Doka*, *Daniella Olivieri*) développent leurs feuillages avant les pluies de début de saison (Serpantié G., communication orale), ce qui explique et la précocité de démarrage et le profil en palier, de la phase de croissance (démarrage plus tardif de la strate herbacée et des autres espèces ligneuses).

- L'ensemble II, de surface sensiblement plus importante que celle de l'ensemble III (16% de la surface de la zone de validation), dessine une sorte de corridor entre les deux ensembles précédents, incurvé selon une orientation nord-ouest / sud-est puis nord-est / sud-ouest, s'évasant largement au sud de la fenêtre. Dans sa section nord-ouest / sud-est, il sépare l'ensemble I en deux aires de surface très inégale. Au sud-est de l'image, il assure le contact entre le gros de l'ensemble I et l'ensemble III. Plus complexe et plus hétérogène que les deux ensembles précédents, il est formé de classes AVHRR dont le comportement emprunte à la fois à celui des classes de l'ensemble I et à celui des classes de l'ensemble III. Dans la partie sud-est de l'image, ce corridor coïncide clairement avec la zone de transition entre le plateau gréseux de Bondoukou et la dépression du Mouhoun. Comme on l'a vu (paragraphe 2.2.3) il s'agit surtout ici de paysages caractérisés par de nombreux affleurements rocheux, d'éboulis, de lithosols et d'horizons concrétionnés superficiels (bowés démantelés), dans une topographie confuse de glacis érodés, entaillés de thalwegs profonds. Faiblement peuplés, ces milieux utilisés surtout pour l'élevage extensif, s'apparentent à une mosaïque végétale très mouvante, globalement plus ligneuse que l'ensemble I, mais à couvert arboré sensiblement moins dense que dans l'ensemble III. Ces caractéristiques très variables se retrouvent précisément dans les courbes de comportement temporel des classes constituant cet ensemble.

2.5.4.2 Les grands ensembles à l'échelle de la région de Bondoukou

Il nous a semblé intéressant de représenter les données précédentes, relatives à la fenêtre de validation, en les réinsérant dans le cadre plus large du site de Bondoukou correspondant au site SALT (image carrée de 1° de côté, figure 2-27 C et D). A cette échelle, en effet, on



perçoit plus clairement la relation entre les couverts végétaux (classes AVHRR) et le dispositif général d'organisation du relief, tel qu'il est schématisé dans la figure 2-28. Aussi bien dans la figure 2-27 C que la figure 2-27 D, les limites des grands ensembles (I+II) et III se calent effectivement sur celles qui séparent la vaste dépression du Mouhoun, qui s'évase peu à peu du sud-ouest vers le nord-est, des plateaux qui la dominent à l'ouest et à l'est / sud-est. Le substrat gréseux de ces derniers est recouvert majoritairement de formation de savanes boisées (et de forêts claires) dont seul un élément de taille réduite apparaissait dans la fenêtre de validation (figure 2-27 B). Au contraire, les savanes peu ligneuses et les espaces cultivés de l'ensemble I occupent largement la grande dépression de la Volta Noire, auréolées d'une frange composite de savanes plus diversifiées, sur des surfaces plus variées (ensemble II).

2.6 - CONCLUSION

Après calibration et correction des données brutes AVHRR à 1.1 km, des améliorations du signal ont été apportées aux données standard de la fenêtre de Bondoukouy (filtrage INTUITIV et BISE). A partir de ces données, la classification par nuées dynamiques a permis d'obtenir 16 classes de savanes de pixels temporels AVHRR.

- Dans une première étape, on a sélectionné les pixels les plus homogènes (en terme de proportion de pixels SPOT correspondant à des types de savanes bien identifiés) de chaque classe AVHRR, et défini ainsi le comportement temporel de chacune de ces classes.

- Le comportement temporel de chaque classe AVHRR a été ensuite caractérisé sur la base de paramètres phénologiques extraits des courbes temporelles NDVI. On peut alors regrouper les 16 classes AVHRR en 3 grands ensembles de comportement phénologique.

- Enfin, la signification de ces trois grands ensembles de savanes a pu être établie par comparaison avec les données de terrain et de l'imagerie SPOT. Deux ensembles majeurs

contrastent fortement : savanes peu ligneuses cultivées de la dépression du Mouhoun et savanes boisées (ou forêts claires) des plateaux surplombant la dépression. Un troisième ensemble, plus réduit, correspond à une mosaïque de savanes recouvrant un substrat finement différencié et assure la transition entre les deux premiers ensembles.

L'image de la classification temporelle des données AVHRR à 1 km permet donc d'assurer un degré d'identification déjà appréciable de la structure de la savane soudanienne.

CHAPITRE 3 :

**L'APPROCHE CONTINENTALE:
La spatialisation à l'échelle de l'Afrique**

3.1 - OBJECTIFS GENERAUX

La démarche qui consiste à appliquer à l'ensemble du continent africain la classification réalisée sur Bondoukouy, à partir d'un jeu de données pluriannuelles à résolution dégradée (GVI), s'inscrit de plain-pied dans le contexte scientifique international décrit dans les premières pages de ce travail. Il est important, en effet, de pouvoir fournir des états de surface à l'échelle continentale pour un grand nombre de recherches menées dans le cadre du programme IGBP (IGBP-DIS, 1995 ; Brown J. *et al.*, 1993 ; Townshend J. *et al.*, 1991). Dans ce contexte, l'étude présentée ici correspond à une approche qui sera testée et validée sur les sites SALT d'Afrique de l'ouest et, plus globalement, contrôlée à partir des documents cartographiques disponibles. Compte tenu de la résolution dégradée des images, la classification a pour objectif de dégager un maximum de grands domaines biogéographiques, compatibles avec une lisibilité et une interprétation satisfaisante du document (Justice C. *et al.*, 1986 ; Goward S. *et al.*, 1987). S'agissant également d'une classification fondée sur le comportement temporel NDVI, on cherchera à comparer les types d'espaces et de biomes ainsi mis en évidence avec les données actuellement disponibles sur la végétation africaine (Fontès J. *et al.*, 1995). La prise en compte de plusieurs années consécutives permettra, sur les sites SALT notamment, d'interpréter les fluctuations possibles d'une année à l'autre du signal (Justice C. *et al.*, 1985).

3.2 - LES GRANDES ETAPES DE LA CARTOGRAPHIE GLOBALE DE LA VEGETATION D'AFRIQUE

3.2.1 Les premières approches de la biogéographie africaine

La représentation cartographique des écosystèmes africains a été inaugurée par Engler A. (1910). Cette première étape a essentiellement consisté en une distinction des grandes subdivisions naturelles. Par la suite, cette nomenclature a été affinée par Chevalier A., (1938) et a abouti à la définition des domaines biogéographiques sur l'Afrique de l'ouest puis sur l'ensemble du continent africain. Cette carte demeure une référence classique avec sa délimitation latitudinale donnant une première idée de la localisation des domaines écologiques. Lebrun J. (1947) cartographia plus précisément les grandes oppositions entre

l'Afrique tropicale sèche et l'Afrique tropicale humide. Les divisions phyto-géographiques de l'Afrique et de Madagascar furent délimitées plus spécifiquement par Monod T. (1957), l'amélioration relative de la précision des cartes produites s'accompagnant d'une meilleure description des spécificités de chacune des zones répertoriées.

3.2.2 La phase d'investigation approfondie

Il fallut attendre presque 10 ans après les travaux de Monod, pour que les premières cartes phyto-géographiques de l'Afrique soient dressées en tenant compte de la répartition des pluies et de la longueur de la saison sèche (Troupin G., 1966). C'est à partir de cette date que différents chercheurs vont préciser les limites biogéographiques des domaines en de nombreux points du continent africain; une synthèse phytogéographique de la flore africaine fondée sur les travaux des botanistes est ainsi proposée par Schnell R. en 1976. Par la suite, l'Unesco entreprend d'unifier, sous la direction de White F. en 1983, les cartes biogéographiques des différents Etats africains. Cette compilation, accompagnée de considérations sur les milieux physiques, a permis de dresser une carte qui se trouve être à l'heure actuelle la meilleure synthèse de la répartition des écosystèmes sur ce continent.

3.2.3 Les premiers apports de la télédétection

A partir des années 1980, les travaux de synthèse des informations biogéographiques entrepris à l'échelle globale (Küchler A. et Zonneveld I., 1988) s'accompagnent des premières réflexions sur l'apport de la télédétection dans l'analyse évolutive des milieux. Leur approche privilégie les techniques classiques de la photo-interprétation et propose des synthèses de la répartition des couvertures végétales africaines. Ces résultats présentent cependant un caractère relativement statique; ils sont mal adaptés à l'étude de la phénologie et difficilement utilisables dans l'objectif d'un suivi temporel de la végétation. Le caractère "figé" de ces synthèses ne permet généralement pas de lever les ambiguïtés qui pèsent sur l'emplacement des limites entre certains domaines biogéographiques et notamment entre les différents types de savanes et de forêts sèches. Certes, des études à caractère local ont incontestablement apporté des éléments de réponse importants concernant la description des milieux ainsi que la définition des écosystèmes (Gautier L., 1990). Mais l'extension de cette démarche locale à

l'échelle régionale et continentale pose de nombreux problèmes et l'évolution temporelle des écosystèmes est insuffisamment prise en compte (Matthews E., 1983; Holdridge L., 1947 ; Leemans R., 1990 ; Olson J. *et al.*, 1989 ; Wilson M. and Henserson-Sellers A., 1985).

3.3 - DONNEES ET METHODOLOGIE UTILISEES

3.3.1 Données

Outre les documents de cartographie globale déjà référencés ci-dessus, deux sources d'information ont été utilisées : l'une, d'origine, satellitaire provient des capteurs NOAA/ AVHRR et SPOT, l'autre correspond à des relevés cartographiques de terrain ainsi qu'à des cartographies plus générales, comme la carte de White.

3.3.1.1 Les données AVHRR à 15 km de résolution

Des synthèses hebdomadaires d'images NOAA/AVHRR sous forme de données au format GVI à 15 km de résolution spatiale sur l'ensemble du globe sont disponibles au CESBIO (Annexe A). Issues d'un échantillonnage spatial et temporel de mesures réalisées à l'origine avec des données à 1 km de résolution (Kidwell B., 1991), ces mesures offrent une grande souplesse d'utilisation. Tous les plans image sont en projection Plate Carrée et sont par conséquent superposables entre eux. De plus, les données sont beaucoup moins perturbées par la présence des nuages et par les effets directionnels de prise de vue (Holben B., 1986).

Nous avons toutefois jugé préférable d'appliquer aux données à 15 km les mêmes traitements de calibration (cf 2.3.2.1) et de corrections atmosphériques que pour l'approche locale. A cet effet, on a pu disposer des données brutes des canaux visible, proche-infrarouge et thermiques à la résolution GVI. Les mesures archivées offrent cinq années consécutives de mesures acquises sans interruption entre le 1^{er} janvier 1986 et le 31 décembre 1990 par les satellites NOAA9 et NOAA11. Le vieillissement du satellite NOAA9 nous a cependant contraint à éliminer l'année 1988, car la dérive de ce capteur provoquait des retards d'orbite rendant les images inexploitable en raison des angles zénithaux solaires élevés. En conséquence, seules les données des quatre années complètes: 1986, 1987, 1989 et 1990, ont

été utilisées. C'est donc 208 images hebdomadaires qui ont été traitées au total.

3.3.1.2 Les données SPOT du programme SALT

Les renseignements obtenus par l'imagerie SPOT ont été utilisés pour visualiser les écosystèmes en place et observer les types de formations présents sur le transect SALT. Ces données ont été acquises, pour le programme SALT, aux périodes clés du développement végétal (au printemps et à l'automne). Nous avons ainsi pu documenter l'aspect des cycles d'évolution temporelle de la végétation à l'échelle inter- et intra-annuelle. En particulier, des liens ont été établis entre les données à basse résolution telles que les données GVI et les cartographies issues des travaux sur le terrain.

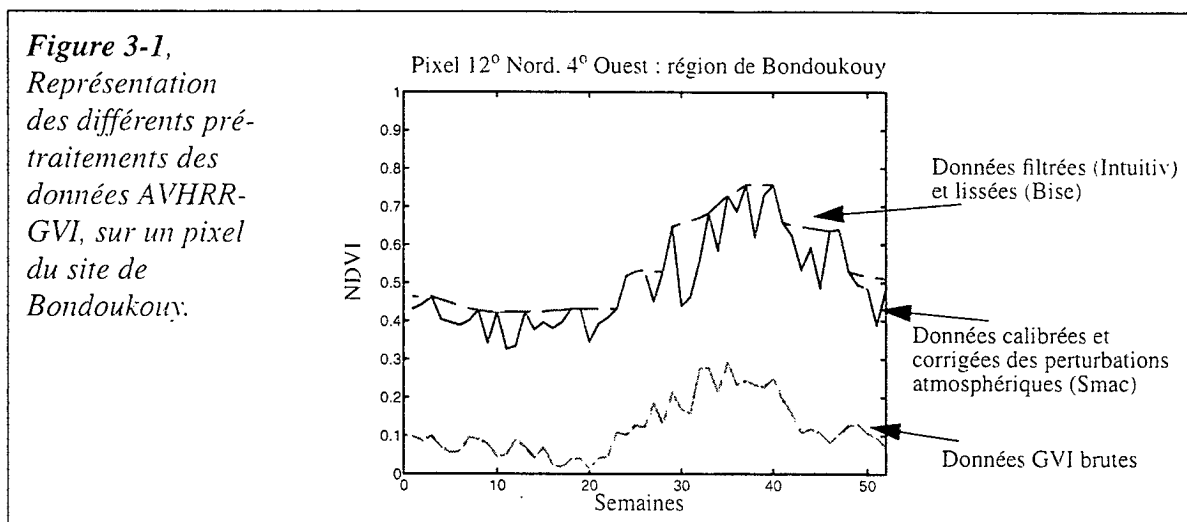
3.3.1.3 Les cartographies de terrain SALT

Ces documents correspondent à des approches cartographiques propres à chaque site SALT (30km x 30km). L'imagerie SPOT recueillie pendant la période 1986-1990, combinée aux connaissances acquises sur le terrain, a permis de dresser des cartes d'occupation du sol pour chacun des cinq sites. D'un site à l'autre, les cartes correspondantes sont établies par différents auteurs, géographes, biologistes ou hydropédologues de terrain (Gautier L., 1990; Lavenu F., 1990 ; Gautier L. et Chatelain C., 1990 ; Devineau J-L. et Kaloga B., 1992; Serpantié G. *et al.* , 1992 ; Hiernaux P., 1992 ; Valentin C. *et al.*, 1992). Ces cartes sont documentées par des postes de légende très variables selon les auteurs et selon la diversité des approches. Selon le site choisi, les informations cartographiées concernent la nature du sol (granulométrie, couleur, etc...), la structure des formations végétales en terme de stratification du couvert ou encore une typologie des formations de savane. Ces cartes ont permis de confirmer que chaque site était globalement caractérisé par un type dominant de savane et que l'ensemble des formations décrites sur ces sites était représentatif des différentes structures de savanes présentes en Afrique de l'Ouest.

3.3.2 - Méthodologie

3.3.2.1 Adaptation des pré-traitements aux données GVI

La démarche suivie est décrite par la Figure 3-2. Les traitements effectués pour analyser la série temporelle AVHRR à 15 km de résolution sont identiques à ceux décrits dans le chapitre 2, aux corrections géométriques près, déjà réalisées par la NOAA. Concernant les pré-traitements, la différence tient uniquement au moindre volume des données traitées. En effet, les données au format GVI sont des synthèses spatiales et temporelles et donc nettement moins volumineuses que les données AVHRR à pleine résolution. Les données de calibrations ont donc la même origine (Teillet P. et Holben B., 1993). Les corrections atmosphériques sont également réalisées avec le modèle SMAC (Rahman H. et Dedieu G., 1994). Enfin, le filtre thermique INTUITIV (Loudjani P. *et al.*, 1994) ainsi que le lissage par la méthode BISE (Viovy N. *et al.*, 1992) ont permis d'obtenir les évolutions temporelles sur les quatre années d'archive AVHRR (Figure 3-1).



En tout état de cause, la séquence des pré-traitements SMAC, INTUITIV et BISE permet déjà de fournir des documents plus fiables, de distribution spatiale des grands biomes du continent africain comme l'illustre la figure 3-3. Dans cette figure, par exemple, la carte de

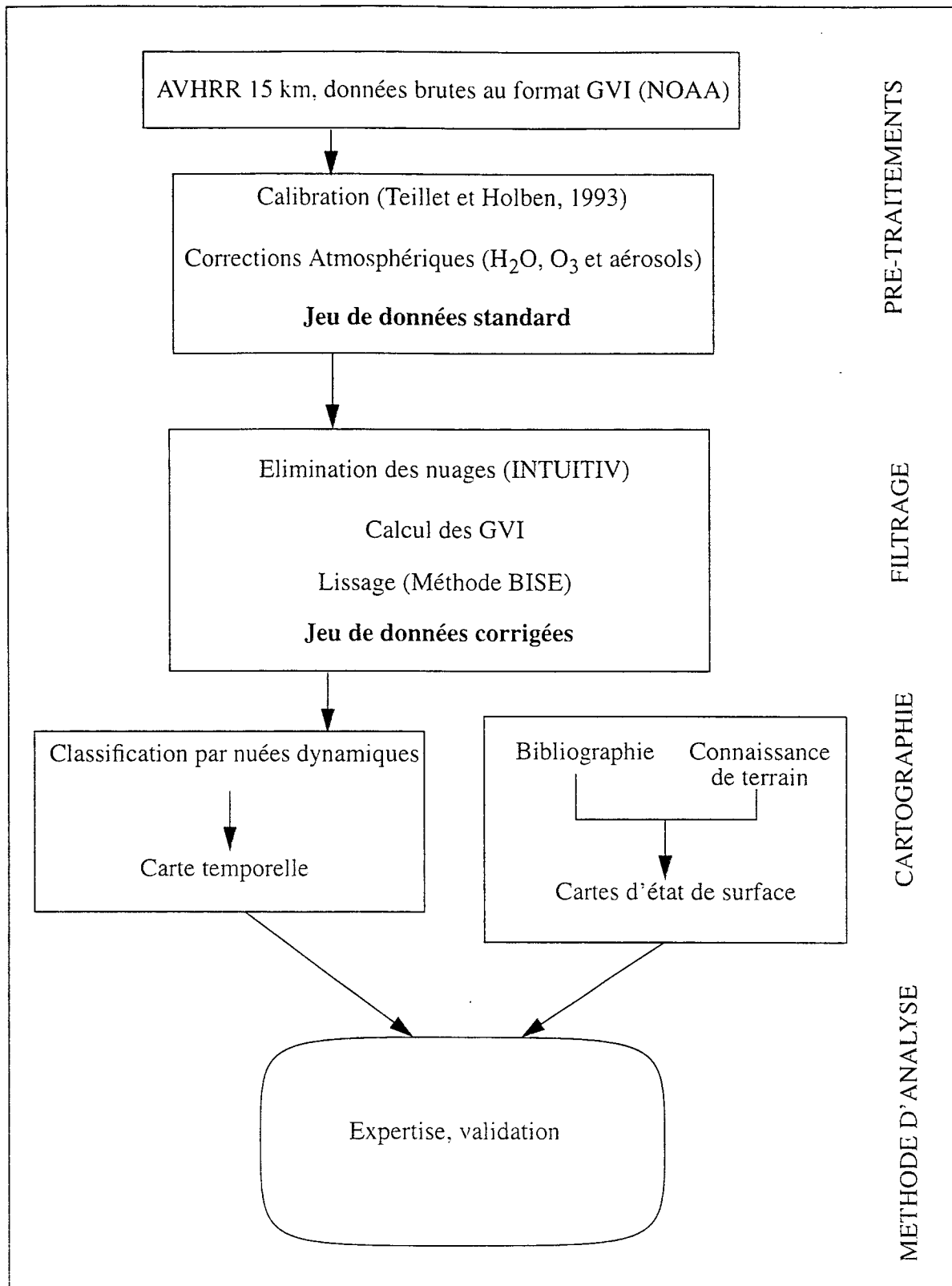


Figure 3-2. Démarche de traitement des données AVHRR à l'échelle continentale africaine.

gauche, non corrigée et non filtrée, n'isole pas tous les types de savanes. Le nord du Burkina -

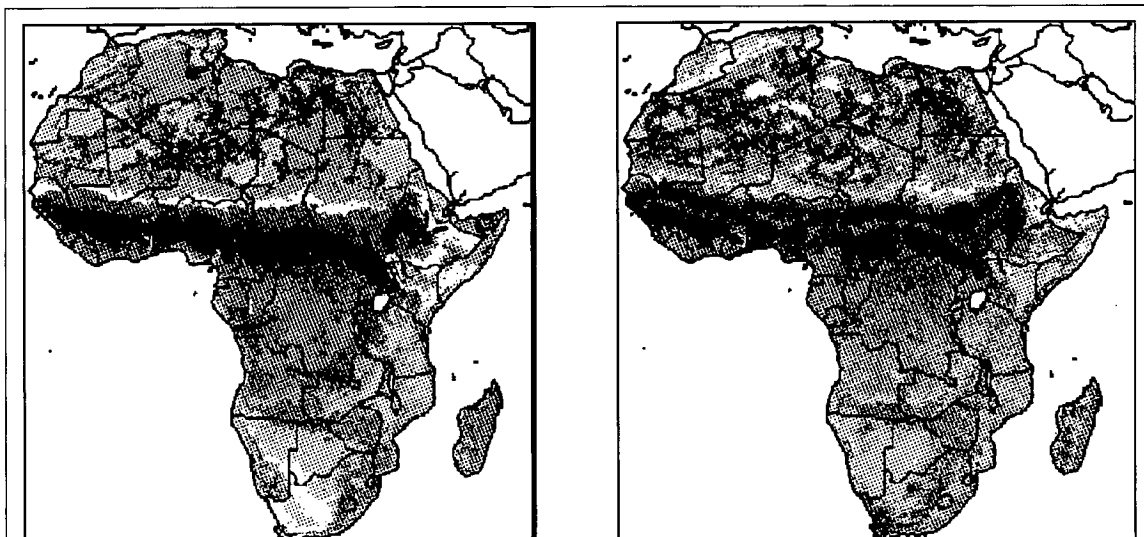


Figure 3-3, Amélioration de la cartographie temporelle AVHRR. A gauche, l'image est non corrigée et non filtrée. A droite, l'image est corrigée de l'atmosphère et filtrée par les méthodes BISE et INTUITIV.

Faso est assimilé à un espace franchement désertique, tout comme le nord du Kenya vers le lac Turkana. De même les espaces forestiers sont mal perçus du seul fait de l'ennuage sur la façade atlantique du massif congolais.

3.3.2.2 La classification par nuées dynamiques de l'Afrique

La carte présentée ici (figure 3-4) est le résultat d'une classification automatique effectuée sur la série de quatre années d'acquisition NOAA/AVHRR selon la méthode déjà évoquée dans le chapitre 2 et en Annexe C. Rappelons que cette méthode de classification fondée sur le principe du regroupement des pixels ayant un même comportement dans le temps, permet d'associer un type de comportement temporel à une classe. Dans le cas de l'Afrique, une vingtaine de classes ont paru suffisantes pour décrire la variété des biomes et assurer une bonne lisibilité de la carte. Ce nombre apparaît en effet comme un compromis raisonnable qui a l'avantage de faciliter la comparaison entre la classification obtenue et les données cartographiques déjà publiées à cette échelle (White F., 1983). Le choix du nombre de classes s'effectue pendant les calculs de la classification. On peut dès lors choisir le nombre approximatif de classes suivant la finesse souhaitée de regroupement des pixels. Le nombre de classes ne peut toutefois pas être connu *a priori* car des regroupements de classes à faible

effectif surviennent lors des segmentations dichotomiques de la classification par nuées dynamiques. A chaque classe sont associées une courbe de comportement GVI et une couleur.

3.3.2.3 Logique chromatique de la restitution cartographique

Dans la figure 3-4, on a cherché à élaborer une nomenclature de couleurs traduisant le plus logiquement possible le comportement temporel.

- La teinte de la couleur est dépendante du niveau moyen du signal dans la gamme chromatique rouge, jaune, verte, bleue et violette; le rouge indique une intensité faible (peu ou pas de végétation) et le violet une intensité forte (phytomasse verte abondante).

- La saturation est contrôlée par la phase de végétation active traduite par le signal. Plus la phase est longue, plus la couleur est saturée et ceci dans chaque gamme de teinte. Le niveau de saturation différencie les décalages de phase liés au régime des pluies de part et d'autre de l'équateur.

- La table de couleurs utilisée renseigne ainsi sur la longueur de la phase active ainsi que sur le niveau du signal. En rouge, vert et violet se distinguent les comportements définis par une durée de phase active relativement courte et un niveau de signal respectivement faible, moyen et fort; les comportements caractérisés par un niveau de signal élevé mais avec une phase plus longue sont codés en bleu.

3.4 - ANALYSE DES RESULTATS

3.4.1 - Description des comportements et relations avec les grands biomes

Il s'agit ici de caractériser globalement les principaux domaines biogéographiques et leurs comportements temporels, mis en évidence sur les documents de restitution cartographique. On distingue essentiellement 4 ensembles majeurs, autour desquels s'organisent les milieux africains (Figure 3-4).

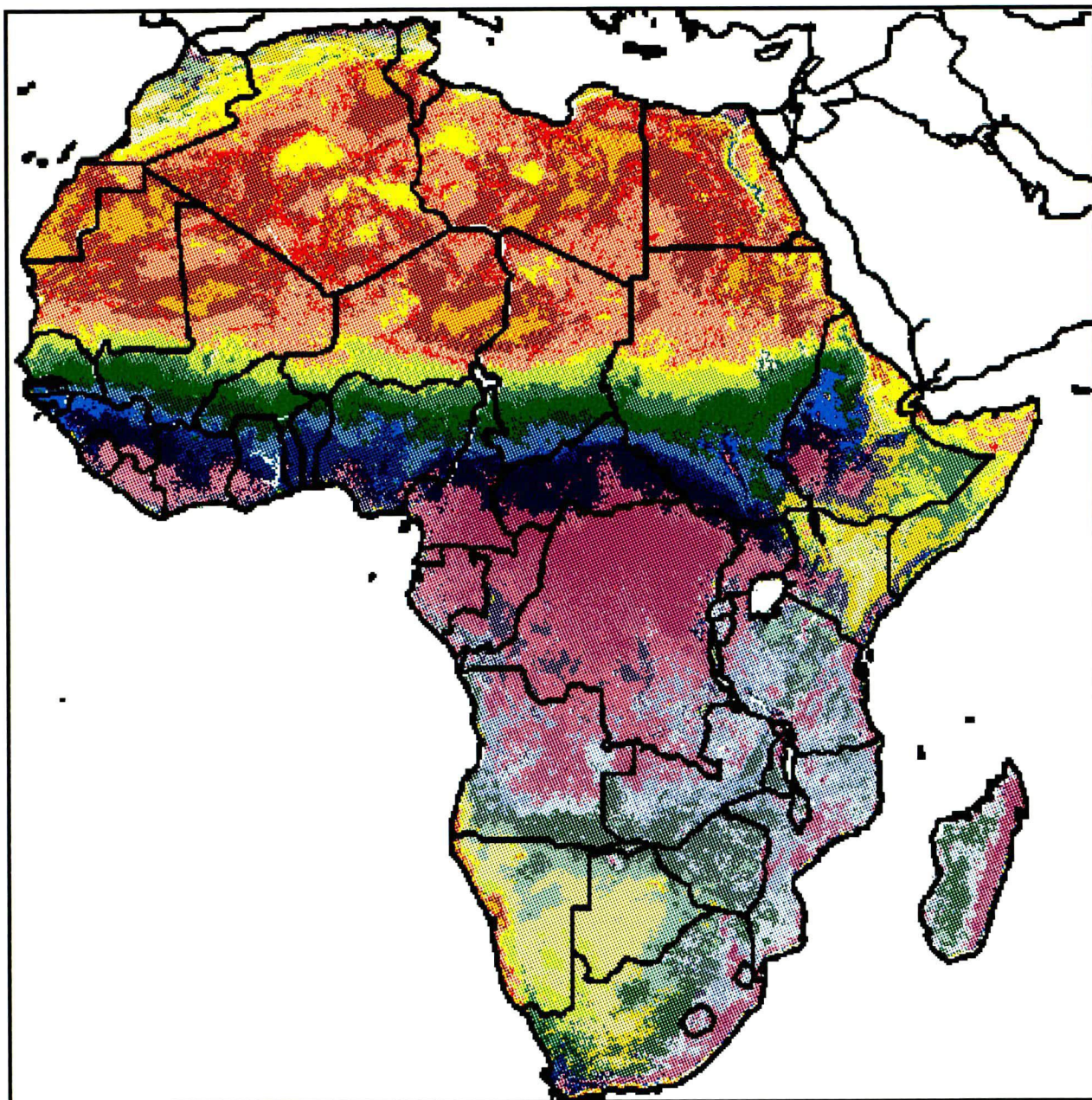


Figure 3-4 Classification temporelle AVHRR-GVI (1986-1990) des grands biomes africains (la légende est présentée page suivante).

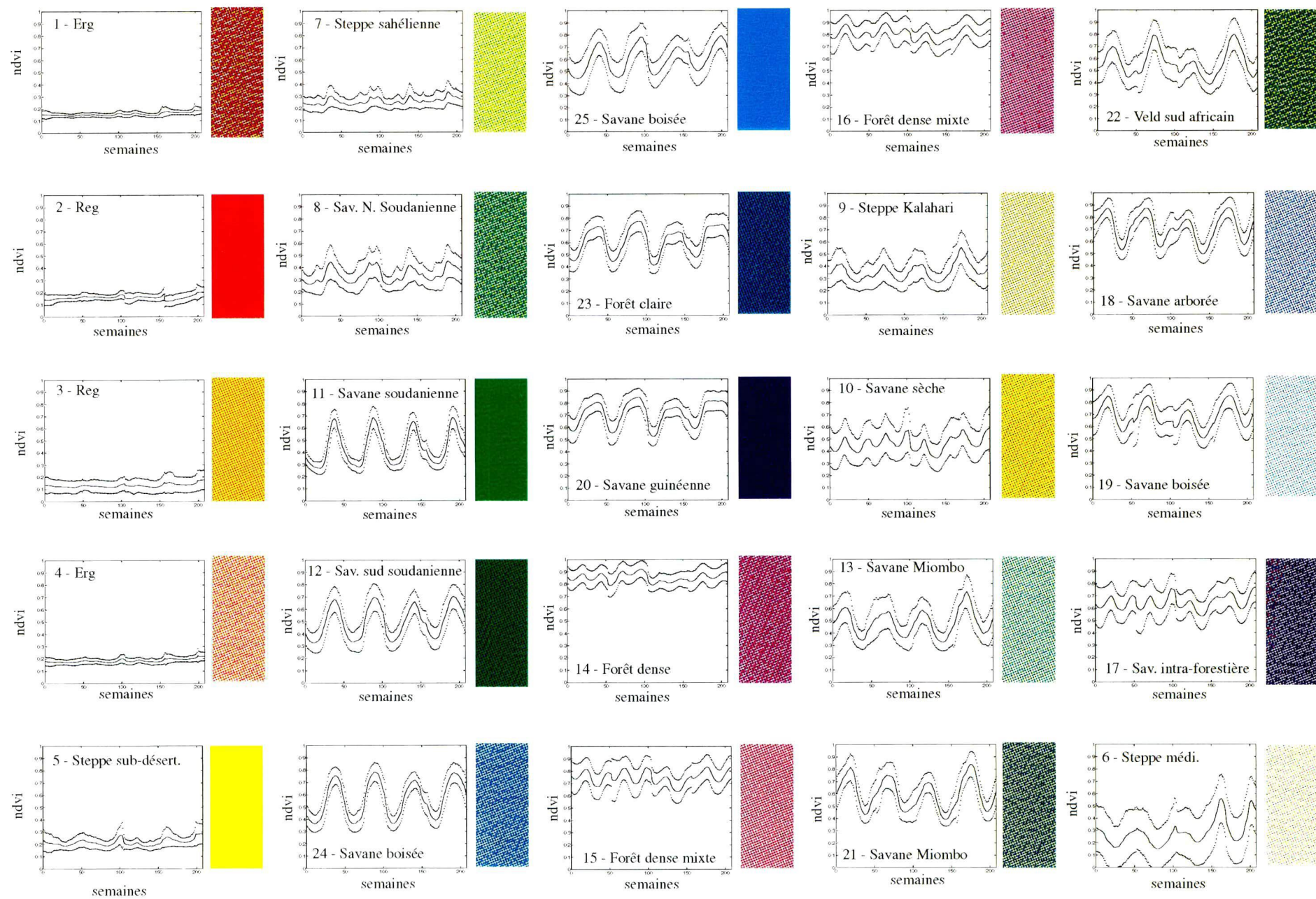


Figure 3-4 Légende de la classification présentée page précédente.

3.4.1.1 Le domaine saharien

Les couleurs rouge, rose, orange et jaune sont caractéristiques du domaine saharien et sud-atlasique. Au sein de cet ensemble, les cinq classes concernées (de 1 à 5) montrent un signal GVI faible et relativement stable. Les différents types de milieux (ergs sableux, regs, massif rocheux) se répartissent parmi ces 5 classes, sans que l'on puisse toujours clairement affecter une classe à un milieu donné. On peut distinguer néanmoins assez bien un certain nombre d'entités :

- la dépression d'In Salah et le piémont nord du Tassili N'Jer (jaune : classe 5) où s'amorce déjà un certain rythme bioclimatique annuel.

- Le grand Erg oriental, l'Erg Chech et le désert du Ténéré (classe 1, rouge sombre)

- Le grand Erg occidental, l'Erg Iguidi et une partie de la dépression mauritanienne d'El Djouf (rose, classe 4 à très faible rythmicité)

3.4.1.2 L'ensemble sub-saharien à gradient régulier nord-sud

La bordure sahélienne au sud du Sahara s'étend latitudinalement de la côte atlantique du sud mauritanien aux bords de la Mer Rouge du nord éthiopien. Cette bande de contact entre le désert et les premières formations steppiques semi-arides appartient majoritairement à la classe 7 (vert-jaune) où la rythmicité saisonnière est plus marquée et plus régulière que celle de la classe 5

Vers le sud, parallèlement à la latitude, se déploie le gradient des savanes de l'hémisphère nord. Ces bandes régulières marquent ainsi le développement croissant de la couverture végétale des classes 8 (savanes nord-soudaniennes), 11 (savanes soudaniennes) et 12 (savanes sud-soudaniennes), à amplitude de rythmicité annuelle de plus en plus creusée.

Dans la gamme des bleus, les savanes arborées et forêts claires (classes 25, 24 et 23) et les savanes guinéennes humides (classe 20) s'interpénètrent plus vers le sud, la courbe de

comportement temporel montrant un "plateau" sommital de mieux en mieux exprimé.

Le passage aux formations forestières denses du massif guinéen à l'ouest, du bassin congolais au centre et des hauts plateaux éthiopiens à l'est (classes 14, 15 et 16), est caractérisé par un signal GVI très élevé et à périodicité plus complexe. Ces massifs sont très nettement identifiables et leurs localisations sont en bonne correspondance avec les documents cartographiques disponibles (White F., 1983). Quelques particularités locales sont toutefois à signaler :

- On observe que la savane pénètre parfois profondément dans les massifs forestiers au gré des conditions locales comme c'est le cas du V baoulé en Côte d'Ivoire, qui ressemble d'ailleurs plutôt à un U aujourd'hui, ce qui pourrait traduire une certaine avancée de la savane. Des phénomènes comme la contiguïté de la savane et de l'océan au Togo-Benin, se distinguent aussi nettement. Celle-ci peut-être liée aux effets d'abri climatique générés par la présence du massif de l'Atakora.

- Des zones d'activité végétale intense, liées à des deltas intérieurs, sont repérables comme le Nil dans la région du Sudd au Soudan (classe 20, 25 et 16) ou dans une moindre mesure, le Niger au Mali, entre Mopti et Tombouctou (classes 11 et 12).

- Enfin, nous pouvons noter la claire expression de l'avancée forestière à l'intérieur du domaine des savanes, en République de Centre Afrique, entre le fleuve Bomou et les Monts Bongo.

3.4.1.3 L'ensemble à gradient en auréole du Kalahari

En Afrique australe se développe une vaste auréole à l'est du désert littoral de Namibie. Celui-ci a pour origine l'up-welling de l'Atlantique sud (courant froid de Benguela). Ce désert, cantonné à la frange côtière, est dominé immédiatement vers l'est par le plateau namibien (entre 1000 et 2000 mètres). Le milieu devient semi-aride et se couvre d'une steppe analogue à celle du Sahel (classe 9, à rythme phénologique austral). Cet espace correspond essentiellement au Kalahari, vaste territoire comprenant l'intérieur de la Namibie, le Botswana

et le nord-ouest de la République Sud Africaine.

L'auréole se développe largement autour de cette masse semi-aride. Les teintes vertes (classes 13, 22 et 21) représentent les formations savaniques de l'hémisphère sud, couramment dénommées "formations Miombo" (White F., 1983). Certaines de ces formations, qui s'étendent au sud de l'Angola, au sud-ouest de l'Afrique du Sud, en Zambie et en Tanzanie, apparaissent comme des formations homogènes et encore peu exploitées, alors qu'au Zimbabwe, au Malawi et au centre de l'Afrique du Sud, ainsi que dans l'ouest de Madagascar, ces formations, nettement plus fragmentées, semblent se rattacher à des zones plus peuplées à forte pression anthropique.

La partie périphérique orientale de l'auréole est occupée par des formations cartographiées en bleu (classes 18 et 19). Leur comportement temporel évoque celui des savanes guinéennes de l'hémisphère nord, exception faite du déphasage de rythme lié à l'inversion des saisons. Ces formations entrent en contact vers le nord avec les massifs forestiers du bassin congolais (Angola, Zaïre, Zambie) et vers l'est, avec les massifs forestiers côtiers (Madagascar, Tanzanie, Mozambique, Afrique du Sud), dans lesquelles elles s'imbriquent de façon diffuse.

Au sein du grand massif forestier congolais (classes 14, 15 et 16, violet), on peut également observer des secteurs relativement étendus, à comportement de savanes (classe 17). Il s'agit probablement de zones fortement défrichées, localisées autour des grandes agglomérations urbaines de Brazzaville au Congo et de Kinshasa au Zaïre et dans le cours inférieur de la vallée du Zaïre, des régions de Kitwit et de Kananga, au sud du Zaïre, ainsi que des montagnes très densément peuplées du Rwanda et du Burundi.

Enfin, quelques observations complémentaires peuvent être notées :

- Au centre de l'Angola, un triangle violet (classe 15 dominante) semble indiquer la présence d'une couverture forestière dense sur le plateau de Luanda, alors que les documents cartographiques disponibles (White F., 1983) font plutôt état d'une forêt claire sèche.

- L'opposition entre les deux versants de Madagascar apparaît nettement. Le plateau de l'ouest, abondamment défriché et cultivé en raison de l'explosion démographique de ces dernières décennies, contraste avec l'est plus sec, encore recouvert de forêt.

- Les prairies des plateaux situés de part et d'autre de Johannesburg (Veld) se détachent nettement (classe 22 dominante) entre les steppes du Kalahari et les savanes boisées.

- Enfin, de nombreux phénomènes locaux peuvent être reconnus sur la carte : on citera en particulier la mosaïque végétale méditerranéenne complexe, où existent des classes variées, dans la région de Cape Town en Afrique du Sud, ou les bassins endoréiques du nord du Botswana, l'un aride (Makgadikgadi, classes 4 et 5), l'autre à végétation dense (Okavango, classes 16 et 19).

3.4.1.4 La corne orientale de l'Afrique

La partie orientale de l'Afrique se singularise quelque peu par un comportement différent des deux zones précédemment décrites. La corne de l'Afrique est occupée par deux espaces franchement désertiques (classes 2, 4 et 5) l'un à l'est de la Somalie (vallée du Nogal), l'autre s'étendant de Djibouti jusqu'au sud de l'Erythrée. Des formations de steppes et de savanes sont disséminées dans les basses plaines d'Ethiopie, du Kenya et sur l'ensemble de la Somalie, exception faite d'une bande forestière côtière au sud de Mogadiscio (classe 16).

L'un des faits marquants de cette région réside dans le caractère particulièrement abrupt du contact entre des domaines bioclimatiques très contrastés, en raison de la vigueur des reliefs qui accidentent cette zone du Rift, et dont les escarpements dominent plateaux et bassins d'effondrement, provoquant un brusque gradient altitudinal supérieur à 1500 - 2000 m. L'altitude commande ainsi un régime climatique favorisant le développement de couvertures végétales denses au-dessus des steppes et des déserts. Ainsi en est-il du grand escarpement rectiligne nord-sud du massif éthiopien, dominant la dépression Danakil, escarpement jalonné par les villes de Desé, d'Ankober et d'Addis Abeba. Là, on passe brusquement des formations semi-arides steppiques (classes 6 et 10) aux couvertures denses de savanes humides (classes 20 et 25) puis aux forêts denses (classes 14, 15 et 16).

Plus au sud, au Kenya, les bas plateaux à maigre savane sèche et steppe herbeuse (classes 9 et 10) entrent en contact avec les forêts d'altitude (classes 14 et 15) de la chaîne kenyenne (5200 m), du Kilimandjaro (5895 m) et de l'Elgon (4321 m).

3.4.1.5 - Suivi de la dynamique de la végétation africaine 1986-1990

La classification par nuée dynamique, appliquée à chacune des quatre années étudiées, permet de produire des documents rendant compte du cycle annuel des couvertures végétales et de leur comportement phénologique. Les cartes de la figure 3-5 nous permettent d'apprécier les variations survenues entre ces différentes années. A cette échelle, à cette résolution et dans ce laps de temps, c'est bien entendu essentiellement la variabilité climatique interannuelle qui joue le rôle principal.

On observe qu'une ambiance un peu plus humide caractérise l'année 1987 comparée à celle de 1986. D'une part, les formations de forêt en Angola semblent plus actives (couleur violet plus prononcée), et d'autre part, les steppes du Kalahari et de Somalie montrent un regain d'activité. Ces évolutions sont moins facilement perceptibles dans l'hémisphère nord, malgré certaines variations observables au nord du Sénégal.

L'année 1989 semble avoir été une année très sèche en Afrique australe. L'auréole organisée autour du Kalahari prend de l'ampleur et se charge de couleurs plus chaudes, trahissant l'abaissement du signal GVI (Afrique du Sud, Madagascar, Botswana, Angola, Mozambique et Zambie). Ce phénomène, qui se retrouve jusqu'au coeur de la forêt dense zaïroise (classe 14), est particulièrement net pour les classes 19 et 22, notamment dans les prairies du Veld sud-africain (classe 22), dont le cycle de 1989 est singulièrement écrasé (légende de la figure 3-4). Par contre, l'Afrique boréale semble avoir largement échappé à cette oscillation plus sèche.

Au contraire, l'année 1990 marque un regain d'activité végétal tout à fait remarquable. Sur l'ensemble du continent, les couleurs froides gagnent du terrain, le niveau du signal GVI atteint voire dépasse celui de l'année 1987, notamment dans les formations Miombo (classe 13) et d'autres types de savanes (classes 20 et 25). Des avancées de steppes sahéliennes

(classe 7) vers le désert saharien marquent, parallèlement, une remontée de l'humidité dans l'hémisphère nord, comme on pourra également le retrouver à l'échelle du site SALT de Bidi-Bahn (paragraphe 3.4.3)

3.4.2 - Les domaines de savane de l'Afrique occidentale

Il a semblé intéressant d'examiner de façon plus approfondie le cas particulier de l'Afrique de l'Ouest et de ses milieux savanicoles, en tirant parti des connaissances accumulées sur les sites SALT. L'objectif est ici de mettre en relation les classes de la classification globale obtenue sur l'Afrique avec les types de végétation reconnus sur les sites SALT.

3.4.2.1 Le transect SALT : un pôle de validation

Dans le but d'améliorer la compréhension et de valider la représentation cartographique à l'échelle AVHRR-GVI, les informations recueillies sur les cinq sites situés le long du transect central nord-sud du programme SALT sont utilisées (figure 1 -1). Ce transect traverse, en effet, un ensemble de formations de savane de grande variabilité quant aux proportions respectives de végétation boisée, arbustive et herbacée. Cette variabilité s'organise selon une structure en bandes latitudinales parallèles, le long du gradient de pluviométrie. Comme on l'a vu précédemment (3.3.1.3), chacun des 5 sites correspond à un type dominant de savane. A partir de ce constat, la superposition géométrique des cinq sites sur les images AVHRR est effectuée (figure 3-6), afin d'observer l'évolution de leur comportement dans le temps. Chaque site appartient majoritairement à une seule classe AVHRR dont l'extension spatiale a été mise en correspondance avec un poste de légende de la classification de Schnell R. (1976). La synthèse de ces correspondances est présentée dans le Tableau 3-1.

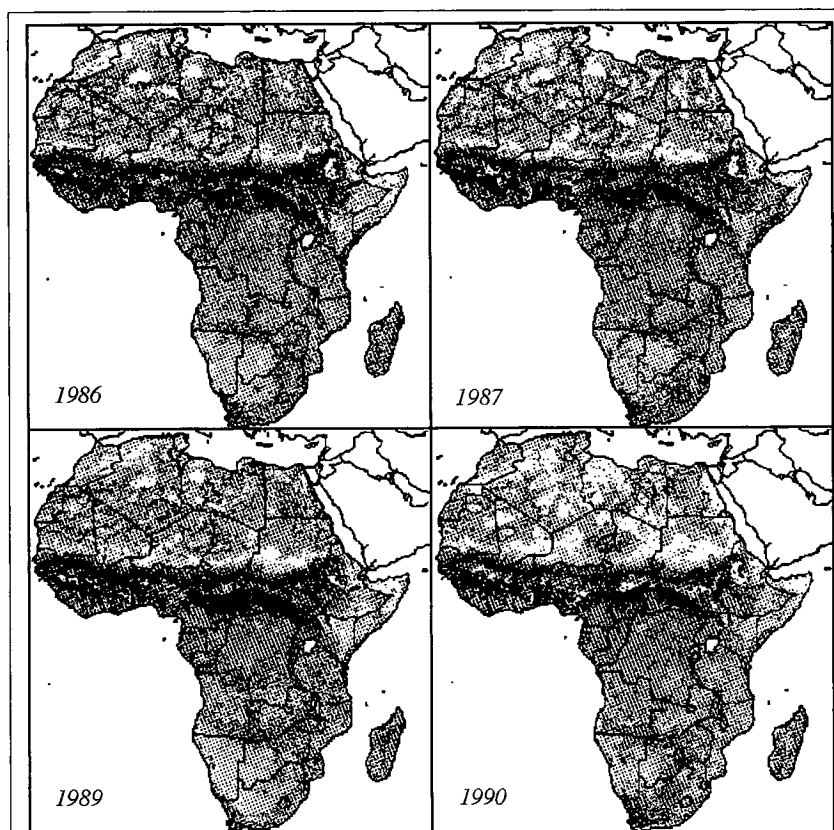


Figure 3-5, Cartes annuelles de la végétation africaine, issues des classifications AVHRR-GVI

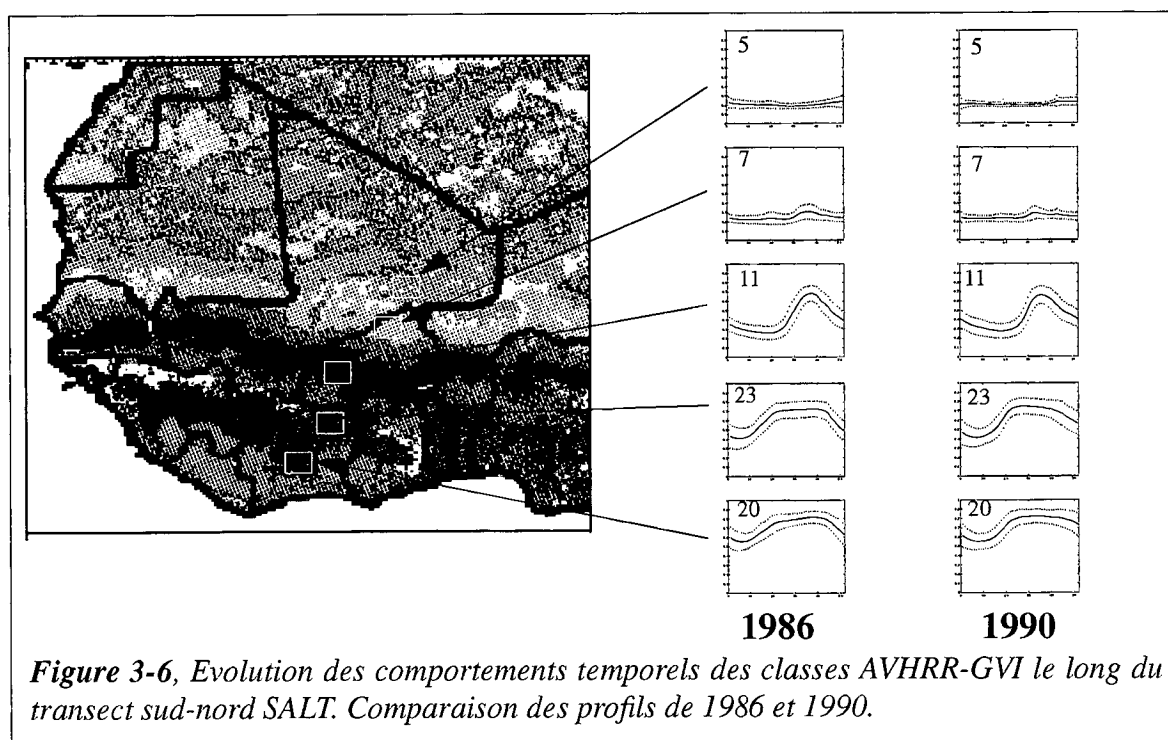


Figure 3-6, Evolution des comportements temporels des classes AVHRR-GVI le long du transect sud-nord SALT. Comparaison des profils de 1986 et 1990.

Tableau 3-1, Correspondance des sites SALT et des classes AVHRR-GVI

n°	NOM	PAYS	TYPE DE COUVERT	n° classe AVHRR
1	Lamto	Côte d'Ivoire	Savane Guinéenne	20
2	Ouango-Fitini	Côte d'Ivoire	Forêt Claire Soudanienne	23
3	Bondoukouy	Burkina-Faso	Savane Soudanienne	11
4	Bidi-Banh	Burkina-Faso	Savane Nord-Soudanienne	7
5	Hombori	Mali	Steppe Sahélienne	5
6 ^a	Thyssé - Keymor	Sénégal	Savane Soudanienne	11
7 ^a	Souilène	Sénégal	Steppe Sahélienne	7
8 ^a	Banizoumbou	Niger	Steppe Sahélienne	7

a. sites SALT hors étude.

A chaque site de contrôle SALT est donc normalement associée une classe AVHRR distincte caractérisée par un cycle végétatif spécifique. Cependant, à cette échelle et à cette résolution, les domaines de transition ne peuvent être mis en évidence, si bien que certaines confusions entre types de couverts peuvent se manifester. C'est le cas, en particulier, pour le site de Bidi-Bahn (classe 7) qui appartient au domaine des savanes nord-soudaniennes mais dont certains caractères l'apparentent déjà clairement aux steppes sahéliennes, qui se répartissent ainsi entre les classes AVHRR 5 et 7. Chacune des classes AVHRR de savane est documentée en terme de structure des formations et de phénologie à partir des relevés de terrain et des images à haute résolution spatiale du satellite SPOT. A titre d'exemple, on décrira ci-dessous les sources d'informations disponibles pour le site n° 2 (Ouango-Fitini), correspondant à la classe AVHRR-GVI 23 (figure 3-7).

L'aspect du couvert analysé sur le terrain à l'occasion des études écologiques (Poilecot P., 1989) et les données recueillies lors des missions de validation des images SPOT, ont permis l'établissement d'une cartographie de terrain fiable (Lavenu F., 1990). Cette connaissance du milieu peut dès lors être mise en relation avec la courbe d'évolution du NDVI qui caractérise la classe d'appartenance des pixels GVI correspondant au site de Ouango-Fitini. On interprète alors le profil temporel selon les caractéristiques connues du site. Dans cette démarche, à la différence de la méthode utilisée dans le chapitre 2 sur le site de Bondoukouy, on n'a pas jugé pertinent de superposer géométriquement les plans AVHRR-

GVI et SPOT-XS. Le changement d'échelle est en effet beaucoup trop important pour justifier cette procédure, et le nombre de pixels AVHRR-GVI - compris entre 4 et 9 par site - trop peu significatif pour autoriser le calcul des proportions de classes SPOT.

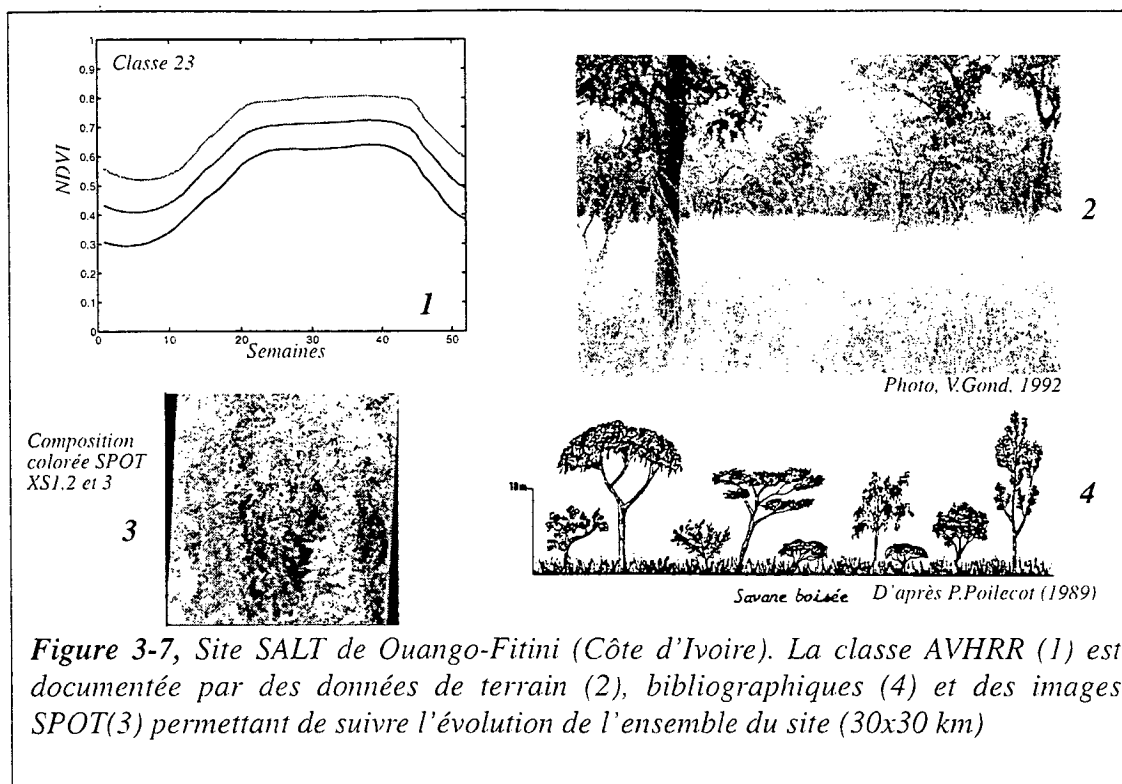


Figure 3-7, Site SALT de Ouango-Fitini (Côte d'Ivoire). La classe AVHRR (1) est documentée par des données de terrain (2), bibliographiques (4) et des images SPOT(3) permettant de suivre l'évolution de l'ensemble du site (30x30 km)

3.4.2.2 - Identification des différents types de savane de l'Afrique de l'ouest par leur comportement temporel

Les évolutions annuelles des classes sont reportées sur la légende de la figure 3-4. Tout au long du transect, les cinq classes, correspondant chacune à l'un des cinq sites, sont identifiées (Figure 3-6). Deux courbes temporelles annuelles ont été choisies : 1986 (année relativement sèche) et 1990 (année plus humide). Depuis le domaine de savane guinéenne (Lamto, site n° 1) au sud, jusqu'à celui des steppes sahéliennes au nord (Hombori, site n° 5), les courbes d'évolution phénologiques, caractérisées par leurs paramètres (tableau 3-2) changent de configuration d'un domaine à l'autre :

- du sud au nord, la courbe passe d'un profil relativement régulier à large ondulation peu marquée à un signal quasi-plat. Les formes intermédiaires offrent des pics de moins en moins

marqués. Cette succession traduit bien celle de biomes marqués par une saison sèche de plus en plus longue et vigoureuse et, parallèlement, par une période d'activité de plus en plus courte (de 40 à 8 semaines).

- l'amplitude du signal (de 0.3 à 0.8), proportionnelle à la quantité de biomasse verte présente, diminue du sud au nord, en liaison avec le gradient climatique sud-nord.

- outre la réduction de la durée du cycle d'activité chlorophyllienne, le retard du démarrage de la phase de croissance est d'autant plus important que l'on va vers le nord : début 12^o semaine à Lamto au sud, 12^o semaine à Ouango-Fitini, 27^o semaine à Bondoukouy et 30^o semaine à Bidi-Banh. Ce retard traduit l'arrivée progressive du front pluvieux de "mousson" depuis le golfe de Guinée. Pour le site d'Hombori, le cycle n'est pas détectable à cette résolution et compte tenu de la sensibilité de l'indice NDVI sur une végétation très clairsemée.

- la longueur du "plateau" (ou du sommet) de la courbe, qui exprime la durée de la période de "maturité", diminue du sud vers le nord. Très faible dans les sites les plus septentrionaux, elle dure entre 20 à 25 semaines, dans les savanes guinéennes (Lamto) et sud-soudaniennes (Ouango-Fitini) mais elle chute très brutalement (7 semaines) dans les savanes soudaniennes (Bondoukouy). La largeur des plateaux des deux sites méridionaux traduit essentiellement une stabilisation de l'activité chlorophyllienne à un haut niveau, compte tenu de la précocité du démarrage de la phase active.

- le début de la période de sénescence est de 2 à 3 semaines plus précoce dans les savanes soudaniennes (Bondoukouy), par rapport aux deux sites méridionaux. Ce décalage, beaucoup moins important que celui qui caractérise le début de la phase d'activité (15 semaines), traduit la rapidité de mise en place du régime d'Harmattan commandant l'installation de la saison sèche sur l'ensemble de l'Afrique de l'ouest.

Classes AVHRR	20		23		11		7		5	
Sites SALT correspondant	Lamto		Ouango		Bondoukou		Bidi-Banh		Hombori	
Années	1986	1990	1986	1990	1986	1990	1986	1990	1986	1990
Période d'activité ^a	39.5	39.5	40.5	39.5	24	24	9	8	-	-
Amplitude NDVI ^b	.26	.28	.31	.33	.44	.38	.10	.06	-	-
Maximum NDVI ^b	.82	.85	.74	.74	.69	.67	.33	.31	-	-
Démarrage du cycle ^c	12	14.5	12	12.5	27	28	30.5	30	-	-
Durée de maturité ^a	21	25	23	18.5	7.5	6	-	-	-	-
Début sénescence ^c	43.5	47	43.5	41.5	40.5	37.5	48	43.5	-	-

a. Nombre de semaines

b. NDVI entre 0 et 1

c. numéro de semaine de 1 à 52

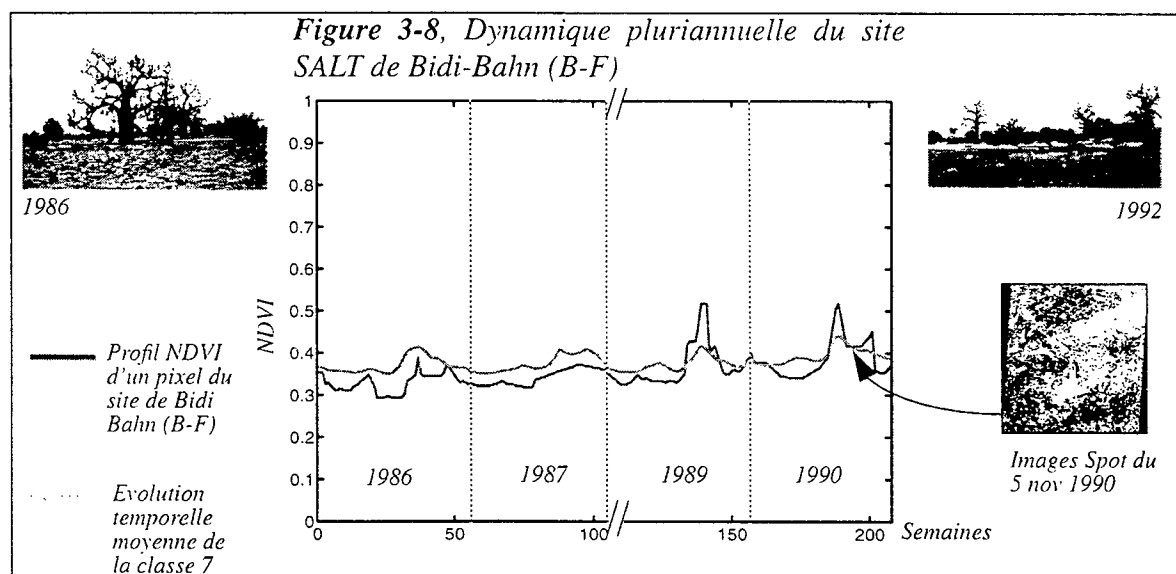
Tableau 3-2, Paramètres phénologiques des différentes classes de savane correspondant aux sites SALT

3.4.3 - Dynamique pluriannuelle des savanes de l'Afrique de l'ouest

Les courbes de comportement calculées année par année permettent de rendre compte des différences entre les cycles d'activité annuels de chacun des types de savane attachés aux sites SALT de l'Afrique de l'ouest (figure 3-6) et de caractériser ainsi leur dynamique pluriannuelle. On se limitera ici à l'analyse d'un comportement temporel particulier, celui du site SALT de Bidi-Bahn de 1986 à 1990 (figure 3-8). Ce site correspond en effet à un domaine de savanes nord-soudaniennes à tendance de steppe sahélienne (transition "savane-steppe" propre à la région du Yatenga), domaine pour lequel le balancement année humide - année sèche se traduit clairement dans les paysages et sur les images.

Un pixel a été choisi aléatoirement au centre du site SALT, pour représenter l'ensemble des 9 pixels du site de Bidi-Bahn. Dans la figure 3-8, le comportement de ce pixel est représenté en trait gris foncé. En trait gris clair apparaît le comportement moyen des pixels de

la classe n°7 à laquelle appartient le site de Bidi-Bahn. On constate que les cycles annuels sont relativement monotones en 1986 et 1987, alors qu'en 1989 et 1990, un pic d'activité chlorophyllienne domine en milieu de saison. Cette activité a pu être reliée à une modification du couvert végétal grâce à l'analyse des images SPOT et aux observations recueillies lors de missions de terrain. Le développement de la strate herbacée sur le site durant la période d'observation, a été largement décrit (Lavenu F., communication orale), cette strate étant pratiquement absente en 1986. L'interprétation la plus communément admise est la quasi-destruction de la strate herbacée accompagnée d'une importante mortalité des ligneux pendant les années de sécheresse 1984, 1985 et 1986 dans la région du Yatenga. Le rétablissement des réserves hydriques du sol à partir de 1987 a permis à la végétation de se développer jusqu'à aujourd'hui (Couteron P., communication orale, 1995). L'observation satellitaire permet ainsi de suivre la réponse de la strate herbacée à la disponibilité des réserves hydriques avec une période de latence d'au moins deux ans (les données de l'année 1988 n'ayant pu être traitées).



On peut par ailleurs s'interroger sur la différence de comportement très marquée, entre le site de Bidi-Bahn (représenté par son pixel) et la moyenne de la classe d'appartenance, pour les deux années 1989 et 1990. On peut supposer que le front de mousson a pu être particulièrement actif durant ces deux années là dans la région du Yatenga.

3.5. CONCLUSION

L'approche continentale a permis de mettre en évidence les grands traits de structure et de dynamique de la végétation africaine :

- La classification par nuées dynamiques des données quadriennales au format GVI fournit une image des grands biomes africains caractérisés par leurs comportements phénologiques moyens. Elle permet de regrouper et d'identifier les milieux africains autour de quatre ensembles majeurs : le domaine saharien ; l'ensemble sud-saharien à gradient nord-sud ; l'ensemble en auréole autour du Kalahari ; la corne orientale de l'Afrique.

- Cette classification rend compte, de la même façon, de la dynamique pluriannuelle de ces grands biomes, au cours des quatre années étudiées. Le comportement des biomes est analysé en fonction du couple humidité / sécheresse caractérisant les années climatiques.

Le comportement temporel des principaux types de savanes de l'Afrique de l'ouest peut être caractérisé et validé par les données recueillies sur les sites SALT, dont chacun correspond à une classe AVHRR donnée.

/ a qui
ser con ne
+ dans
le devant

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de cette étude était de caractériser les savanes ouest africaines à partir des séries temporelles d'images NOAA-AVHRR. Cet objectif, qui se rattache pour l'essentiel à la thématique du "land cover change", s'inscrit à la fois dans le cadre des recherches développées dans le programme SALT ainsi que dans celui, plus large, de certains sous programmes IGBP. Enfin, notre travail relève également de la problématique du changement d'échelle en télédétection (échelle spatiale mais aussi échelle temporelle). En effet, il s'agissait ici de comparer et de mettre en relation de longues séries temporelles à basse résolution spatiale (AVHRR) et des données spatialement mieux résolues (SPOT-HRV et relevés de terrain).

Deux séries de données ont été utilisées : d'une part des données NOAA-AVHRR à haute résolution spatiale (1 km) sur une durée d'un an (1990) et d'autre part, des données ré-échantillonnées (15 km) sur une période de quatre années (1986 - 1990). Ces jeux de données ont été pré-traités par différentes procédures afin de les rendre pleinement compatibles (sur le plan radiométrique, géométrique, temporel) avec d'autres informations de résolutions et d'échelles différentes (SPOT, données de terrain, données cartographiques...).

Notre méthode a consisté d'une part, à synthétiser les données AVHRR (sous forme du NDVI ou du GVI) à travers une classification automatique par nuées dynamiques du comportement temporel des surfaces observées ; d'autre part, cette synthèse a été analysée et confrontée aux données de terrain ou aux données cartographiques existantes, pour valider la classification et déterminer les différents types de couvertures.

Deux approches ont été explorées. La première approche a été conduite à l'échelle locale sur le site SALT de Bondoukouy (Burkina-Faso), à partir des données NDVI à haute résolution. Sur la base du comportement phénologique des pixels et des classes AVHRR, il a été possible d'établir un certain nombre de correspondances avec des types de formations identifiés notamment sur les images SPOT préalablement classées. Pour mettre en relation la classification AVHRR et la classification SPOT, nous avons d'abord identifié et caractérisé les

pixels AVHRR les plus homogènes, avant de pouvoir décrire chacune des classes AVHRR en référence aux différentes classes SPOT. Au terme de cette analyse et après la confrontation aux données de terrain, trois grands faciès de savanes dotés de structures végétales distinctes, en particulier par leur densité de ligneux, ont pu ainsi être déterminés sur les images multitemporelles NOAA-AVHRR.

Dans la seconde approche, nous avons procédé à une généralisation de la méthode à l'échelle continentale à l'aide des données GVI à 15 km acquises pendant quatre années. Il a ainsi été possible de caractériser les grands biomes africains et d'analyser leurs comportements temporels à partir de la phénologie moyenne et de l'évolution pluriannuelle des données GVI. Des correspondances marquantes, révélées sur les sites SALT, ont permis de discuter plus avant des potentialités de cette méthode à l'échelle continentale.

Notre travail correspond, à l'évidence, à une première approche qui avait essentiellement pour but de tester la méthodologie proposée, à la fois à l'échelle continentale et à partir d'un seul et unique site SALT.

Au-delà de cette première étape, il devrait être possible d'affiner la méthode et d'en assurer une meilleure validation, en suivant plusieurs directions de recherches :

- D'abord, en diversifiant les sites SALT étudiés, de façon à prendre en considération des structures savaniques variées présentant des rythmes bioclimatiques différents et des courbes de comportement temporel contrastées.

- Ensuite, en affinant l'analyse phénologique des courbes de comportement temporel. En effet, ce sont essentiellement les paramètres descripteurs des phases majeures du cycle d'activité chlorophyllienne, qui ont été considérés dans notre travail. Les variations plus discrètes de ces courbes (paliers, décrochements...) véhiculent une information dont la signification est sans doute plus délicate à déchiffrer, mais elles devraient néanmoins pouvoir

être prises en compte pour assurer, le cas échéant, une meilleure discrimination des comportements temporels et des faciès de savane qui leur sont associés. Parallèlement, et de façon plus générale, la mise en relation de ces courbes temporelles avec une base de données pluviométriques, permettrait d'évaluer et de comparer, site par site, la sensibilité de la réponse de l'activité chlorophyllienne aux variations climatiques.

- Enfin, en développant une méthode plus rigoureuse dans la mise en correspondance des données basse et haute résolution spatiale. A la démarche empirique que nous avons adoptés dans notre travail, il devrait être possible de substituer une approche plus formalisée, notamment pour établir la hiérarchisation des paramètres et l'indice global de hiérarchisation qui permettent, justement, de regrouper les classes AVHRR en ensembles thématiques pertinents.

Comme on l'a rappelé dans l'introduction de ce travail, aussi bien les résultats obtenus que les quelques pistes de recherche qui viennent d'être esquissées ci-dessus, s'inscrivent dans la perspective ouverte par le prochain lancement de SPOT-4 avec son instrument VMI. Dans cette nouvelle configuration, en effet, certains problèmes de mise en relation des données basse et haute résolution spatiale, seront sensiblement minorés (simultanéité d'acquisitions, superposabilité géométrique des images, par exemple). Les données alors disponibles faciliteront à coup sûr l'approfondissement des recherches sur la structure et la dynamique des savanes africaines et, de façon plus générale, l'ensemble des études sur l'évolution des couvertures végétales, qui sont au coeur de la problématique du "land cover change".

objets techniques.
 qui lie : une problématique
 ou des savoirs -
 savoirs - pour
 savoirs - pour cultures ou l'homme
 à travers le temps

Mengue F. Richard ?
 Wen ou occy - du rd.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

après le travail technique
 valeur de données
 Changement d'échelle

la petite partie de la
 de travail - pour ne
 le travail technique par le temps

objets du Travail technique - se lie avec technique et
 méthodologie

validé : classifié -> ambiguïté / échelle continue
 dans le processus est à démontrer

2) confondre avec élargir tous l'original et
 sans doute à savoir dans le détail.

l'A. propose : test de la méthode et
 avec de l'original qui
 originalité interne + conscience

validé technique
 univocal -
 bi-modal avec actual
 changements
 univocal

(116
 -> données : application aux modes
 de la science)

Achard F., 1990, Rythmes saisonniers de la végétation en Afrique de l'Ouest par télédétection spatiale. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.

Aman A., 1991, Analyse des changements d'échelles spatiale à partir de données satellitaires: cas des savanes d'Afrique de l'Ouest, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 174 pages.

Bannert D., Hoffman R., Jöns H. et Kruck W., 1980, Etude de reconnaissance des ressources en Afrique à l'aide d'images de satellites (projet BMZ 7522 105), *Institut fédéral pour les sciences de la terre et les matières du sous-sol*, Hannover, réimpression 1989, 84 pages, 6 cartes.

Belward A., and the land cover Validation Working Group, 1995, The IGBP-DIS global 1 km land cover data set: a validation strategy proposal, *Draft Strategy Document*, 28 pages.

Bariou R., Lecamus D., Le Henaff F., 1987, Indices de végétation, Dossiers de télédétection, Centre Régional de Télédétection, Univ. de Rennes, 121 pages.

Brown J.F., Loveland T.R., Merchant J. W., Reed B.C. and Ohlen D.O., 1993, Using multisource data in global land-cover characterization: concepts, requirements and methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **59**, pp 977 - 987.

Cartes du service Géographique de l'A.O.F., 1/500 000^o, Haute Volta, feuille NC-30-NO "Bobo-Dioulasso" 1955; feuille ND-30-SO "San", 1958.

Chevalier A., 1938, Aperçu sur les zones de végétation du territoire (i n: Chevalier, *Flore vivante de l'Afrique Occidentale française*, **I**, p XV-XXVII)

Cihlar J., 1995, AVHRR Global land Cover Product: spatial resolution and the minimum mapping unit, *document préparatoire IGBP*. 7 pages.

Defourny P., 1992, Contribution aux méthodes d'évaluation et de suivi par télédétection satellitaire de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne, Dissertation Doctorale. Université Catholique de Louvain, Belgique. 270 pages.

Devineau J-L., et Kaloga B., 1992, Esquisse cartographique de la végétation et des sols de la région de Bondoukouy (Burkina-Faso) à l'aide d'images SPOT (ech: 1/85 000^o). SALT/ORSTOM. Bobo Dioulasso.

Engler A., 1910. Die Pflanzenwelt Afrikas, insbesondere seiner tropischen gebiete, in Engler et Drude, *Die Vegetation der Erde*, **IX**.

Faizoun C., Podaire A. and Dedieu G., 1994, Monitoring of sahelian aerosol and atmospheric water vapor content characteristics from sun photometer measurements. *Journal of Applied Meteorology*, **33**, n^o11, pp 1292-1303.

Faizoun C., 1991, Suivi par mesures photométriques de l'épaisseur optique des aérosols et du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère sahélienne: application à la correction des mesures de télédétection et l'inversion satellitaire de l'épaisseur optique des aérosols, Thèse de

Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 274 pages.

Falk-Langemann A., 1993, NOAA HRPT Africa processing system, S/W system for Unix computer, Version 1.0, *Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung mbH*, Munchen. 40 pages.

Fontès J., Guinko S., 1995, Carte de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina-Faso, éch: 1/1 000 000⁰, 67 pages, ICIV, Toulouse, France.

Fournier A., 1994, Cycle saisonnier et production nette de la matière végétale herbacée en savanes soudanaises pâturées, les jachères de la région de Bondoukouy (Burkina-Faso), *Ecologie*, **25**, n°3, pp. 173 - 188.

FY 1991 research plan, the U.S. global change research program, *Comittee on Earth and Environmental Sciences*, 1990, 169 pages.

Gautier L., 1990, Contact forêt savane en Côte d'Ivoire centrale, *Candolea*, **45**, p 7.

Gautier L., Chatelain C., 1990, Proposition d'une méthode de relevé pour les études de végétation basées sur les images satellitaires à haute résolution, *Document interne CJBG/SALT*, Genève, 13 pages.

Gond V., Cabot F., Chebouni A. and Meunier J. - C., 1995, Determination of vegetation parameters through measured and simulated AVHRR data over SALT/HAPEX-Sahel site, *Journal of Hydrology*, In press.

Goutorbe J.-P., Lebel T., Tinga A., Bessemoulin P., Brouwer J., Dolman A., Engman E., Gash J., Hoepffner M., Kabat P., Kerr Y., Monteny B., Prince S., Said F., Sellers P. and Wallace J., 1994, HAPEX-Sahel: a large scale study of land-atmospheric interactions in the semi-arid tropics, *Ann. Geophysicae*, **12**, pp 53-64.

Goward S.N., Tucker C.J. and Dye D.G., 1985, North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer, *Vegetatio*, **64**, pp 3-14.

Goward S.N., Dye D., Kerber A. and Kalb V., 1987, Comparison of north and south american biomes from AVHRR observations, *Geocarto International*, **1**, pp 27-39

Goward S.N. and Huemmrich K.F., 1992, Vegetation canopy PAR absorptance and the Normalized Difference Vegetation Index: an assessment using the SAIL model, *Remote Sens. Environ.*, **39**, pp 119-140.

Guillet B., Achoundong G., Bonvallot J., Girardin C., Happi H., Mariotti A. et Schwartz D., 1994, L'évidence de la progression de la forêt sur les savanes du Cameroun apportée par l'étude de la composition isotopique des matières organiques des sols. Communication au colloque Dynamique de la limite forêt-savane, Yaoundé, Cameroun, 6 pages.

Hiernaux P., 1992, Zonation écologique du Gourma (Mali), éch: 1/200 000⁰, 5 pages + 39 feuilles, *CIPEA*, Bamako. Mali.

Holben B. N., 1986, characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *Int. J. Remote Sensing*, **7**, n°11, pp 1417-1434.

Holdridge L., 1947, Determination of world plant formations from simple climatic data, *Science*, **105**, pp 367 - 368.

Huete A., 1988, A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sens. Environ.*, **25**, pp 295-309.

IGBP-DIS, 1995, Land cover working group, North America 1-km data set evaluation, *USGS/EDC/SAB*, 10 pages.

IGBP Global Change, 1990, The International Geosphere-Biosphere Program: a study of Global Change. *The Initial core project*, report **12**, 150 pages.

IGBP-HDP, 1993, Relating land use and global land cover change, report **5**, 65 pages.

Justice C.O., Holben, B.N., Gwynne M.D. Monitoring east african vegetation using AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, 1986, **7**, n°11, pp 1453-1474.

Justice C.O., Townshend J.R.G., Holben B.N., Tucker C. J., 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, **6**, n°8, pp 1271-1318

Keay R., 1960, An example of Northern Guinea zone vegetation in Nigeria, Nigerian forestry, *Inf. Bull.*, **1**, 46 pages.

Kidwell B., 1991, NOAA polar orbiter data. *Users' guide*, NOAA Washington DC.

Küchler A., Zonneveld I., 1988, Vegetation mapping, *Handbook of vegetation science*, **10**, Dordrecht, The Netherland.

Lahuec J-P. et Carn M., 1990, Convergence intertropicale, L'intensité de la convection de janvier à avril 1990, *Veille climatique satellitaire*, **32**, pp 8 - 16.

Lahuec J-P. et Carn M., 1990, Convergence intertropicale, L'intensité de la convection de mai à juillet 1990, *Veille climatique satellitaire*, **33**, pp 6 - 13.

Lahuec J-P. et Carn M., 1990, Convergence intertropicale, L'intensité de la convection en août - septembre 1990, *Veille climatique satellitaire*, **34**, pp 5 - 12.

Lahuec J-P. et Carn M., 1990, Convergence intertropicale, L'intensité de la convection en octobre - novembre 1990, *Veille climatique satellitaire*, **35**, pp 9 - 14.

Lahuec J-P. et Carn M., 1991, Convergence intertropicale. L'intensité de la convection de décembre 1990 à février 1991. *Veille climatique satellitaire*, **36**, pp 13 - 22.

Laporte N., 1990, Etude de l'évolution spatio-temporelle de la végétation tropicale: utilisation de données satellitaires NOAA-AVHRR sur l'Afrique de l'ouest, Thèse de Doctorat.

Université Paul Sabatier, 231 pages.

Lavenu F., 1992, Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire, *Projet de recherche dans le cadre SALT*. ENS/LERTS, 33 pages

Lavenu F., Podaire A., Menaut J-C., 1990, Préparation à la cartographie des sites test du projet SALT, document SALT, 12 pages.

Lavenu F., 1986, Photointerprétation Ouarkoyé-Burkina, *LERTS/CRTO*, ech: 1/50 000°, Burkina-Faso/France.

Lebrun J., 1947, La végétation de la plaine alluviale au Sud du lac Edouard (exploration du Parc National Albert, mission J. Lebrun, 1937-1938), *Publ. Inst. Parcs Nat. Congo belge*, Bruxelles, 1947, **2**, 800 pages, 108 fig, 52 phot.

Leemans R., 1990, Possible changes in natural vegetation patterns due to a global warming, *Biosphere Dynamics Project*, **108**, IIASA, A-2361, 13 pages.

Leroux M., 1983, Le climat de l'Afrique tropicale, 633 pages, 250 cartes, *Editions Champion*, Paris.

London J., Bojkov R., Oltsman S., Kelley J., 1976, Atlas of the global distribution of total ozone July 1957-June 1967, NCAR/TN-113+STR, Boulder, Co,USA.

Loudjani P., Cabot F., Gond V., Viovy N., 1994, Improving NDVI time-series Using Imposed Threshold on Irt, IR and Visible values (INTUITIV): a method for reducing cloud contamination and noise in NDVI time series over tropical and subtropical regions, *processing of the 6th Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France.

Malingreau J.P., 1986, Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia, *Int.J. of Remote sensing*, **7**, n°9, pp 1121-1146.

Matthews E., 1983, Global vegetation and land use: new high resolution data bases for climate studies, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, pp 474 - 487.

Menaut J-C., 1993, Effets des feux de savane sur le stockage et l'émission du carbone et des éléments trace, *Sécheresse* n°4, vol. **4**, pp 251 - 262.

Menaut J-C.. 1992, Fonctionnement et dynamique des forêts et savanes tropicales, in Les climats subtropicaux et leur évolution: de l'observation spatiale à la modélisation, *Cours de l'Ecole d'été du CNES*, pp 527 - 546.

Menaut J-C., Podaire A.. 1990, projet SALT: analyse de la dynamique des changements de paysages des savanes d'Afrique de l'Ouest: mécanismes sous-jacents et spatialisation des processus, *Comité Ecosystème du programme Français Géosphère-Biosphère*, 71 pages.

Menaut J-C., 1983. The vegetation of African savannas, in F. Bourlière (ed.), *Tropical savannas*. pp 109-149, Elsevier, Amsterdam.

- Meunier J-C., 1993, Amélioration d'une chaîne de traitements de données NOAA-AVHRR. Application à une série temporelle centrée sur l'Afrique de l'Ouest, DESS Télédétection, Université Paul Sabatier, Toulouse, 24 pages.
- Monod T., 1957, Les grandes divisions chorologiques de l'Afrique, *Cons. Sc. Afr. au Sud du Sahara*, Publ. **24**, 147 pages.
- Olson J., Watts J. and Allison L., 1985, Major world ecosystems ranked by carbon in live vegetation: a database. NDP-017, Carbon dioxide information center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.
- Oort A., 1983, Global Atmospheric Circulation Statistics 1958-1973, *NOAA Professional Paper* **14**, Rockville, Md, USA.
- Pichon J-M., 1994, Intercomparaison de plusieurs indices de végétation, DEA Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 60 pages.
- Pinty B., and Verstraete M., 1992, GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites, *Vegetatio*, **101**, pp 15-20.
- Poilecot P., 1989, Ecologie des savanes soudano-guinéennes: interactions faune-flore dans le Parc National de la Comoé (Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 303 pages.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A., Kerr Y. and Sorooshian S., 1994, A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI), *Remote Sens. Environ*, **48**, pp 119-126.
- Rahman H., Dedieu G., 1994, SMAC: a Simplified Method for Atmospheric Correction of satellite measurements in the solar spectrum, *Int. J. Remote Sensing*, **15**, n°1, pp 123-143.
- Rahman H., Verstraete M., and Pinty B., 1993, A coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. Part 2: semi-empirical model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data, *J. Geophys. Res.*, **98**: 20791-20801.
- Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., Harlan J., 1974, Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation, NASA/GSFC, Type III, *Final report*, Greenbelt, MD, USA, p.371.
- Saint G., 1995, Vegetation newsletter, **2**, JRC, IRSA, Ispra, 12 pages
- Serpantié G., Tézénas du Montcel L., Sabatier S., 1991, Cartographie des ressources végétales au Nord Yatenga (Burkina-Faso). Une méthodologie d'analyse multidade pour les images SPOT de début et de fin de saison des pluies en zone soudano-sahélienne, ech: 1/50 000⁰, *ORSTOM/ENGREF*, 89 pages.
- Schnell R., 1976, Flore et végétation de l'Afrique tropicale, tome **1**, *Gauthier-Villars*, Paris.
- Tanré D., Holben B., Kaufman Y., 1992, Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application. *IEEE transactions on geoscience and remote*

sensing, vol. **30**, n°2, pp 231-247.

Teillet P., Holben B., 1993, Towards operational radiometric calibration of NOAA-AVHRR imagery in the visible and Infrared channels, *Canadian J.R.S.*, submitted.

Townshend J., Justice C., Li W., Gurney C., and McManus J., 1991, Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities, *Remote Sens. Environ.*, **35**, pp 243 - 255.

Troupin G., 1966, Etude phytosociologique du parc national de l'Akagera et du Rwanda. Recherche d'une méthode d'analyse appropriée à la végétation d'Afrique inter-tropicale. Liège, 293 pages, 28 figures, 72 tableaux.

Tucker C., Townshend J., Goff T., 1985, African land cover classification using satellite data, *Science*, **227**, n°4685, pp 369-375.

Valentin C., D'Herbes J.M., Timouk F. et Courault D., 1992, Etats de surface du sol, degré² Niamey Niger, *Orstom/Agrhymet*.

Verstraete M., Leprieur C., De Brisis S., and Pinty B., 1993, Gemi: a new index to estimate the continental fractional vegetation cover, *6th AVHRR data users' meeting*, Belgirate, Italy. EUM P12, pp 143 - 149.

Viovy N., Arino O., Belward A., 1992, The best index slope extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series, *Int. J. Remote Sensing*, **13**, n°8, pp 1585-1590.

Viovy N., 1990, Etude spatiale de la biosphere terrestre: intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, 213 pages.

Vogt J., 1992, Characterizing the spatio-temporal variability of surface parameters from NOAA-AVHRR data: a case study for Southern Mali, *Institute for Remote Sensing Applications*, Joint research Centre, Ispra, Italy, EUR 14637 EN, 266 pages.

White F., 1983, vegetation map of Africa 1/5 000 000, compiled for UNESCO/AETFAT/FAO, *Natural resources research*, 356 pages.

Wilson M., Henderson-Sellers A., 1985, A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models, *Journal of Climatology*, **5**, pp 119 - 143.

ANNEXES

ANNEXE A: CARACTERISTIQUES GENERALES DES CAPTEURS ET DES SATELLITES NOAA

Les données concernant les satellites et leurs capteurs ont été obtenus dans “*Weather satellites: systems, data, and environmental applications*”, de P. Krishna Rao de l’American Meteorological Society, 1990.

La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) exploite les satellites de surveillance météorologique appelés communément TIROS/NOAA. Cette série a commencé le 1^{er} avril 1960 et se poursuit actuellement avec les projets de lancement de NOAA-L en août 1994 (échec) et NOAA-M en novembre 1995. Les satellites utilisés dans cette étude sont principalement NOAA-9 (lancé le 24 décembre 1984 et désactivé en novembre 1988) et NOAA-11 (lancé le 24 septembre 1988). Ces satellites sont le complément des satellites météorologiques géostationnaires (GOES et METEOSAT) et des satellites d’observation de la Terre (LANDSAT et SPOT). la plate-forme mesure 4 mètres sur deux et pèse 1010 kg. Plusieurs instruments y sont installés: le TOVS (Tiros Operational Vertical Sounder) avec le HIRS (High resolution Infrared Radiation Sounder) le SSU (Stratospheric Sounding Unit) et le MSU (Microwave Sounding Unit). Le AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), le SBUV (Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer), SARSAT (Search and Rescue Satellites Aided Tracking System), le DCS (Data Collection System), et enfin le SEM (Space Environment Monitor) complètent l’équipement de la plateforme. L’orbite de ces satellite est synchronisé par rapport au soleil. L’orbite est circulaire à une altitude moyenne de 850 km. En fait elle varie entre 833 et 870 km. Respectivement l’inclinaison orbitale est de $98,739^{\circ}$ et de $98,899^{\circ}$ et la période orbitale est de 101,58 minutes et 102,37 minutes. Cela représente 14,18 et 14,07 orbites journalières. Le décalage orbital est de $2,74^{\circ}$ vers l’ouest à l’équateur. La trajectoire du satellite NOAA-11 traverse l’équateur au *north-bound Equator* (noeud ascendant) à 14h30 à l’heure solaire locale. Les satellites NOAA passent à la verticale d’un même point, donc dans des conditions de prises de vue similaires toutes les 127 orbites soit tous les 9 jours, alors que pour LANDSAT ce nombre de jours s’élève à 18 et pour SPOT à 26.

A.1 LE CAPTEUR AVHRR

Le capteur AVHRR est un radiomètre à balayage dont l'amplitude angulaire est de 110.8° (de -55.4° à $+55.4^\circ$ à la verticale sol-satellite). Il couvre une surface utilisable de 2600 km de large. Sa résolution spatiale est définie par un champ angulaire de $1,3 \pm 0.1$ milliradians donnant pour une altitude de 830 km une surface de vue (pixel) de 1,1 km sur 1,1 km au nadir. Dans des conditions de prise de vue, les pixels de bord de scène ont une résolution de 3,7 kilomètres ce qui implique des chevauchements d'informations et donc une certaines difficultés à interpréter la composition du pixel.

Le capteur AVHRR est équipé de 5 canaux mesurant le rayonnement électromagnétique provenant de la surface du globe. Le spectre de mesure électromagnétique s'étend du visible (0,55 micromètre) à l'infrarouge thermique (12,5 micromètre).

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur AVHRR

canal	longueur d'onde (um)	Mode spectrales
1	0.58 à 0.68	visible
2	0.725 à 1.10	proche infra-rouge
3	3.55 à 3.93	moyen infra-rouge
4	10.30 à 11.30	infra-rouge thermique
5	11.50 à 12.50	infra-rouge thermique

Les rotations du miroir du capteur AVHRR lui permettent d'effectuer 360 balayages terrestres par minute perpendiculairement à son orbite. Le champ de chacun de ces balayages est de 2048 points. Ces points, à 55.4° de la trace orbitale, représentent au sol une amplitude de 2600 km de large. Ces données sont digitalisées sur 10 bits ($2^{10}=1024$).

A.2 FORMAT D'IMAGES

A.2.1 LAC/HRPT

Les types de format se distinguent d'abord en LAC (Local Area Coverage) et HRPT (High Resolution Picture Transmission) qui ont une résolution de base de 1.1 km. Les données HRPT sont transmises en temps réel vers les stations de réception, dans notre cas nous avons utilisés les données provenant de la station de Mas Palomas aux Iles Canaries (Espagne). Le temps de passage au dessus de ces stations (16 minutes d'un horizon à l'autre) limite la longueur des données HRPT à 5760 lignes soit une longueur d'environ 6000 km (soit 55° de latitude). Les données LAC sont stockées par programmation à partir des stations des Etats-Unis sur des enregistreurs de bord afin de pouvoir être transmises lors d'un passage en "vue" d'une station de réception. Les cinq mémoires ont une capacité de 4.5×10^8 bits, correspondant à 110 minutes d'enregistrement GAC (une orbite) ou 10 minutes LAC (Kidwell K., 1991).

A.2.2 GAC

L'échantillonnage en temps réel des données GAC s'effectue directement sur les données LAC/HRPT. Il consiste à fabriquer un point avec la moyenne de 4 pixels sur 5 (le dernier n'entre pas dans le calcul) par pas d'une ligne sur 3. La moyenne des valeurs radiométriques des 4 pixels est alors affectée à l'espace occupé par les 3 lignes sur les 5 pixels. Ce qui nous donne une moyenne radiométrique de 4 pixels affectée à un ensemble de 15 pixels. Le volume d'enregistrement est alors divisé par un peu plus de 5 et la résolution spatiale est réduite à 4 km.

A.2.2.1 Réception

La réception sur Terre s'effectue par les stations de la NASA sur le continent Nord-Américain et par des stations secondaires disséminées sur le globe. La transmission dure 15.5 minutes

lorsque le satellite est à 833 km et de 16 minutes à 870 km. Dès leurs réceptions, les données de niveau 1b (contenant la localisation terrestre de la prise de vue et les informations complètes de calibration) sont classées selon le capteur, la date et le numéro d'orbite. Cette étude a utilisé des données stockés et archivés par l'ESA/ESRIN à Frascati (Italie). Le format d'archivage est le SHARP au format 1B.

A.2.3 GVI

La NOAA produit, ensuite, des indices de végétation à partir des données GAC pour des applications commerciales et scientifiques. Cela consiste à prendre la valeur maximale, sur 7 jours, des pixels GAC. Ce principe a pour avantage d'atténuer l'influence des angles de prise de vue et de l'épaisseur atmosphérique puisque logiquement, on ne garde que la meilleure prise de vue. Sur la grille de 3x5 pixels GAC est alors prise *au hasard* une valeur qui sera affectée à l'ensemble de la zone décrite par les 15 pixels. Les données sont alors rangées dans une matrice de 904 lignes sur 2500 colonnes. Cette matrice couvre le globe entier dans une projection Platte Carrée où sont respectées les longitudes et les latitudes. Dans cette projection, les pixels ont une taille de 15 km. La formule de codage pour les pixel GVI s'écrit de la façon suivante:

$$XVI = Ch2 - Ch1 / Ch2 + Ch1$$

$$NVI = 240 - (XVI + 0.05) \cdot 350$$

A.3 LA CALIBRATION

A.3.1 Les données de calibration

Des détecteurs satellitaires mesurent des coefficients de calibration. Pour les canaux 1 et 2, la mesure s'effectue au sol avant le lancement (calibration de pre-launch): pour les canaux 3.4 et 5, la mesure s'effectue par des thermistors sur un corps noir embarqué à bord et sur la luminance du vide stellaire. Toutefois, il est préférable de prendre des valeurs de calibration

issues de travaux comme ceux de Teillet P., et Holben B., (1993) sur des surfaces homogènes ne variant pas dans l'année comme White Sands (USA), la base Edwards (USA) ou encore La Crau (France), pour inverser des valeurs de vieillissement du capteur et en recalculer des valeurs plus réalistes. C'est à partir de ces études que l'ensemble des données, tant GVI que HRPT, sont traitées. L'homogénéité des procédures et des paramètres d'entrée garantit une bonne intercomparaison des mesures. Les coefficients de calibration sont traités par des facteurs d'échelle, le premier sera divisé par 2^{30} , le second par 2^{22} . Ces deux valeurs entrent alors dans la formule de calibration des données de chaque canal et de chaque pixel:

$$\delta = \alpha (CN + \beta)$$

ou δ = donnée calibrée

CN = valeur brute enregistrée (de 0 à 1023)

α = 1^{er} coefficient de calibration

β = 2^{ème} coefficient de calibration

A.3.2 Réflectance normalisée

Les données du capteur sont exprimées en réflectance corrigée des effets d'angle solaire et de visée pour les canaux 1 et 2 (visible et proche infrarouge). Les pixels subissent l'opération suivante:

$$\rho = \frac{\pi \cdot \sigma}{\cos(\alpha) \cdot \varepsilon}$$

où ρ est la réflectance normalisée

σ est la luminance

α est l'angle solaire

ε est l'éclairement solaire

A.3.3 Radiance thermique

Les canaux 3,4 et 5 expriment la radiance émise par la surface du globe, on obtient des valeurs en Kelvin en appliquant la fonction inverse de Planck aux données calibrées:

$$\Gamma = \frac{\Phi \cdot \delta}{\ln \left(1 + \frac{\tau \cdot \delta^3}{\epsilon} \right)}$$

ou Γ = Kelvin

δ = valeur centrale du segment de mesure de T^0 du capteur (par exemple: canal 4 de NOAA 9: $929.46^{cm^{-1}}$ et canal 5 de NOAA 9: $845.19^{cm^{-1}}$)

Φ = constante (1.1910659×10^{-5} milliwatts/m²)

τ = constante (1.438833 cm⁻⁰K)

La valeur Γ nous indique la chaleur émise par la surface terrestre avec une précision de $1/8^0$.

Bibliographie complémentaire :

Teillet P., et Holben B., 1993, Towards operational radiometric calibration of NOAA-AVHRR imagery in the visible and infrared channels, Canadian J. R. S., submitted

Kidwell K., 1991, NOAA polar orbiter data, Users' guide, NOAA Washington DC.

ANNEXE B : LE SATELLITE SPOT

B.1 LE CAPTEUR HRV

Le programme SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), conçu par la France, la Suède et la Belgique de la série SPOT a été initialisé en 1978. Les lancements se sont échelonnés entre SPOT 1 le 22 février 1986, SPOT 2 le 22 janvier 1990 et SPOT 3 en août 1993. Le satellite SPOT est positionné à une altitude variant de 818 km à l'équateur et de 833 km à son apogée. Son plan d'inclinaison est de $98,77^{\circ}$. L'orbite est héliosynchrone comme NOAA. Le satellite repasse tous le 26 jours au dessus du même point (toutes les 369 orbites). Il effectue 14,19 orbites par jour dont chacune dure 101,4 minutes à une vitesse de 24000 km/heure. Dans l'immédiat, le programme se poursuivra en incorporant une bande spectrale moyen-infrarouge avec SPOT 4 en 1995, SPOT 5 en 2000 et enfin SPOT 6 vers 2005/6, qui finiront la seconde série des satellites SPOT. Pour l'instant, les données ont été utilisées de deux manières dans cette étude. Grâce aux acquisitions systématiques de scènes de ce type par le programme SALT épaulé par le CNES, nous avons bénéficié d'une cinquantaine d'images SPOT réparties sur les cinq sites SALT du transect sud-nord et des deux sites latéraux. Les procédures d'archivage de ces données ont été définies en fonction des rythmes bioclimatiques de chacun des sites. En ce sens, des acquisitions en fin de saisons sèches et en fin de saisons des pluies ont été privilégiées. La qualité des images de ce type vis-à-vis des données AVHRR réside dans une meilleure résolution permettant des liens étroits avec des mesures de terrain et des reconnaissances sur place à partir de ces données. Des cartes ont été dressées à partir de cette archive.

B.1.1 Caractéristiques générales

Les satellites SPOT de la première génération (numéro 1, 2 et 3) sont munis de deux capteurs identiques HRV (Haute Résolution Visible). La seconde génération se verra dotée en plus du capteur "*végétation*", permettant une information plus globale des données SPOT. Ce nouveau capteur (Vegetation Monitoring Instrument) qui équipera la plateforme SPOT est attendu pour sa résolution de 1.1 km. avec une scène large de 2200 km et un champ angulaire de 101° . Les

caractéristiques spectrales des capteurs HRV et VMI sont décrites dans le tableau suivant:

Tableau 1 : Caractéristiques des capteurs HRV et VMI

HRV	longueur d'onde	dénomination
1	0,51 - 0,73	Panchromatique
2	0,50 - 0,59	XS1
3	0,615- 0,68	XS2
4	0,79 - 0,89	XS3

VMI		
B1	0,43 - 0,47	bleu
B2	0,50 - 0,59	rouge
B3	0,61 - 0,68	proche infrarouge
B4	0,78 - 0,79	vegetation
MIR	1,58 - 1,75	vegetation

La résolution au sol du capteur HRV qui nous intéresse dans notre cas, est définie par le champ d'ouverture de l'instrument qui est de $4,13^\circ$. Le canal panchromatique a une résolution de 10 mètres tandis que les trois autres ont une résolution de 20 mètres. Le champ d'observation est de 60 km de large, soit 6000 et 3000 pixels respectivement. Les données sont codées sur 8 bits. Les détecteurs CCD (Charge-Coupled Device) sont regroupés en barrettes de 1728 éléments. Il y a quatre barrettes pour le mode panchromatique et trois fois quatre barrettes pour les autres modes spectraux. Ce dispositif de barrettes assure le balayage ligne par ligne. En revanche, un dispositif de miroir permet de dépointer l'axe de visée. Cette particularité rend la possible l'acquisition d'images à fort angle de prise de vue ($+27^\circ$ à -27° par rapport à la trace du satellite).

B.1.3 Réception

Les transmissions d'informations se font grâce au réseau de stations de réception. Les données sont transmises en vue (2500 km de rayon) avec un débit de 50 millions de bits par seconde. Une station a la capacité de recevoir 700 scènes par jour. Les scènes sont alors vérifiées et archivées sur bandes magnétiques. Les bandes sont alors traitées par le Centre de Rectification des Images Spatiales (CRIS). Ce centre archive et redécoupe les informations en scène de 60 par 60 km en y ajoutant les informations auxiliaires. Toutes ces données servent alors à créer le catalogue permettant à SPOT Image et aux utilisateurs de définir le niveau de traitement souhaité pour livrer les produits. Dans notre cas, nous avons utilisé des images au format 1b (naviguées mais non traitées ni géométriquement ni radiométriquement).

B.1.4 Calibration

La chaîne de traitement SPALTO (Marchant B., 1993) nous a permis de prendre en compte les paramètres de calibration issus de données du CNES (Dinguirard M., et Henry P., 1993). Dans un second temps nous avons procédé à l'intégration d'un module de correction atmosphériques SMAC. Cela nous a permis de retrouver des mesures SPOT comparables aux mesures AVHRR puisqu'elles ont été traitées avec les mêmes paramètres d'entrée. Cette approche est l'une des clefs nécessaires pour pouvoir intercomparer les données multi-temporelles et multi capteurs. Des séries d'images ont été et sont toujours en cours d'acquisition dans le programme SALT et Land Cover Change, c'est pourquoi une telle structure de traitement était primordiale pour le bon déroulement de l'expérience. En tout, ce sont une cinquantaine d'images SPOT qui ont été traitées pour valider les campagnes de terrain.

Bibliographie complémentaire :

Marchant B., 1993, SPALTO, logiciel d'étalonnage et de correction atmosphérique d'images SPOT, LERTS, 46 pages.

Dinguirard M., Henry P. 1994, calibration of the SPOT-HRV cameras, Int. J. Remote Sensing, submitted.

ANNEXE C : La classification automatique (Viovy N., 1990)

C.1- Méthode de classification automatique

C'est une méthode qui fonctionne point par point. L'espace des mesures aux différents instants et aux différentes longueurs d'ondes est représenté par un espace vectoriel de dimension

$$D(X, C) = (X - \bar{M}_C) T \times (X - \bar{M}_C)$$

où \bar{M}_C représente le centre (moyenne de la classe C). Le principe général de la méthode est le suivant : on recherche les nuages de points présents dans l'image éventuellement à partir d'un sous échantillonnage de l'image entière. Il s'agit d'une méthode récursive qui en partant d'une seule classe représentant l'espace tout entier va découper ce dernier de façon dichotomique pour converger vers les nuages de points. Un avantage essentiel de la méthode est que sa complexité est linéaire par rapport au nombre de canaux ce qui permet de l'utiliser pour le traitement de grandes séries temporelles et plus généralement sur un grand nombre de canaux. A chaque itération on suppose a priori que chaque classe est en fait composée de deux nuages de points distincts. On cherche alors une approximation du centre de ces deux nouvelles classes à partir du centre de la classe initiale et de ses propriétés statistiques. Une nouvelle partition de l'espace est ainsi obtenue. Chaque point est alors réaffecté à une des nouvelles classes à partir des centres estimés. On recalcule alors le centre réel de chaque classe.

On peut tester a posteriori si l'hypothèse selon laquelle la classe initiale représentait deux nuages distincts est valide. en effet dans ce cas, on doit observer une diminution de la variance total. Soit C la classe initial et C_1, C_2 les classes résultantes d'écart type respectivement $\sigma(i), \sigma_1(i), \sigma_2(i) i = 1 \dots D$ alors l'hypothèse était valide si

$$\sum_{i=1}^D \sigma(i) > \sum_{i=1}^D \sigma_1(i) + \sum_{i=1}^D \sigma_2(i)$$

on utilisera en fait comme test :

$$\frac{\sum_{i=1}^D \sigma_1(i) + \sum_{i=1}^D \sigma_2(i)}{\sum_{i=1}^D \sigma(i)} < \beta$$

β étant fixé par l'utilisateur, ce qui permet de jouer sur le taux de regroupement. Dans le cas où le test n'est pas vérifié on reprend la classe initial qui ne sera plus modifiée au cours des itérations suivantes. La classe est dite dans ce cas "stabilisée". L'algorithme s'arrête lorsque toutes les classes sont stabilisées ou qu'un nombre maximum d'itérations a été atteint.

C.2 - Description de la méthode du "split phase"

Afin d'avoir un algorithme performant qui soit linéaire en fonction du nombre de canaux, on ne pourra pas avoir recours au calcul des axes principaux du nuage qui nécessite le calcul de la matrice de covariance. Il faut déterminer les coordonnées du centre d'une classe dans chaque dimension indépendamment des autres. Pour ce faire on utilise une approche empirique utilisant la dissymétrie de la classe initiale induite par le fait que les deux sous classes n'ont jamais exactement le même nombre de point. On suppose qu'un nuage de point homogène à une distribution normale. Etant donné deux classes C_1, C_2 de centre M_1, M_2 avec n_1, n_2 points respectivement, le centre de la classe regroupant C_1, C_2 est donné par :

$$\left(\frac{n_1}{n_1 + n_2}\right)M_1 + \left(\frac{n_2}{n_1 + n_2}\right)M_2 = M$$

On voit alors immédiatement que soit $M_1(i) < m(i) < M_2(i)$, soit $M_2(i) < m(i) < M_1(i)$ $i = 1 \dots D$. Déterminer le demi-espace de chaque classe revient à déterminer laquelle de ces deux inégalités est vérifiée. On peut déduire que si $n_1 \neq n_2$ alors le centre de la classe est plus proche d'une des classes (dans le cas où $n_1 > n_2$ $D(M - M_1) < D(M - M_2)$).

Si l'on suppose que les classes C_1, C_2 sont séparées spectralement, la classe regroupant ces deux classes sera dissymétrique et son écart type sera différent si l'on prend en compte les

points à droite et à gauche de la valeur moyenne. On définit l'écart type gauche comme :

$$\sigma_l(i) = \sqrt{\frac{\sum_{X(i) \leq M(i)} (X(i) - M(i))^2}{Nl(i)}}$$

et l'écart type droit comme :

$$\sigma_r(i) = \sqrt{\frac{\sum_{X(i) > M(i)} (X(i) - M(i))^2}{Nr(i)}}$$

avec $Nl(i)$, $Nr(i)$ le nombre de points tels que $X(i) \leq M(i)$ et $X(i) > M(i)$. Alors si ,
 $M_2(i) < M(i) < M_1(i)$, $\sigma_l(i) > \sigma_r(i)$ et au contraire si $M_2(i) < M(i) < M_1(i)$,
 $\sigma_r(i) > \sigma_l(i)$.

La différence entre l'écart type gauche et droit va donc permettre de déduire dans chaque dimension laquelle des classes est située à "gauche" et à "droite" de la moyenne. Plus précisément un des centres sera placé dans la direction des minima de variance et l'autre dans la direction des maxima. On définit alors le centre des classes M_1 , M_2 à l'aide de l'écart type gauche et droit par :

$$\begin{aligned} M_1(i) &= M(i) - \sigma_l(i), M_2(i) = M(i) + \sigma_r(i) \text{ si } \sigma_l(i) \leq \sigma_r(i) \\ M_1(i) &= M(i) + \sigma_r(i), M_2(i) = M(i) + \sigma_l(i) \text{ si } \sigma_l(i) > \sigma_r(i) \end{aligned} \quad i = 1 \dots D$$

C.3 - Choix de la distance d'un point à une classe

Il est fréquemment utilisé dans les algorithmes de classification outre la distance euclidienne la distance de Mahalanobis qui normalise la distance par la matrice de variance / covariance de la classe :

$$D(X, C) = \frac{1}{2\pi \sqrt{|\Sigma|}} C(X - \bar{X}_C)^T \Sigma^{-1} (X - \bar{X}_C)$$

Où $|\Sigma|$ est le déterminant de la matrice de variance / covariance.

Dans un algorithme itératif comme celui présenté ici, ce type de distance n'est pas applicable.

En effet la distance d'un point à une classe diminue quand la variance de celle-ci augmente. Dans le processus de recherche des classes, une classe qui a une grande variance va absorber des points venant d'autres classes et ainsi augmenter encore sa variance. Le résultat conduit alors à converger systématiquement vers une classe unique. C'est pourquoi on utilise ici la distance euclidienne.

C.4 - Mesure de confiance du résultat de la classification

Lors de la phase de classification où l'on affecte chaque point à l'une des classes déterminées ci-dessus, on peut obtenir une mesure de la confiance dans le résultat obtenu. Cette mesure permet d'estimer si un point est beaucoup plus proche d'une classe que de toutes les autres ou bien si il est quasiment à égal distance entre deux classes, auquel cas le résultat de l'affectation est peu significatif. Cette mesure est définie par :

$$confiance(X) = 1 - \frac{D(C_a, X)}{D(C_b, X)}$$

où C_a est la classe à laquelle le point X a été affecté et C_b la seconde classe la plus proche après C_a . Cette mesure varie donc entre 0 et 1, 0 indiquant que le point est à égal distance entre deux classe alors qu'une valeur de 1 indique que le point est au centre de la classe.

Bibliographie complémentaire :

Viovy N.. 1990, Etude spatiale de la biosphère terrestre : intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection, *Thèse de l'Institut Polytechnique de Toulouse*, 213 pages.

ANNEXE D : Article à paraître dans “Journal of Hydrology”

DETERMINATION OF VEGETATION PARAMETERS THROUGH MEASURED AND SIMULATED AVHRR DATA OVER SALT/HAPEX - SAHEL SITE

V. GOND (1), F. CABOT (1), A. CHEHBOUNI (2), J-C MEUNIER (1)

(1) CESBIO, 18 avenue E. Belin 31055 Toulouse cedex, France

(2) ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, Montpellier, France.

ABSTRACT

Vegetation related information is critical for modeling hydrological processes. Remotely sensed spectral data provide powerful means to characterize vegetation status. In this study we investigate the meaning of the results obtained by an automatic classification when applied to time serie of remotely sensed data. This has been achieved by interpreting the classification results in terms of surface physical parameters. The approach adopted was to select several control points with the Hapex-Sahel square degree during the rainy season of 1991 and 1992, and and to compare the temporal the evolution of the albedo based NDVI and that of its corresponding class. The result shows that there is similarity between the evolution of two profiles for all control points during the two years period.

D.1- INTRODUCTION

Vegetation has been identified as one of the most important surface parameter that influence water, energy and CO₂ cycles. The vegetation modifies the distribution of precipitation into surface runoff and infiltration. Its amount controls the partitioning of available energy at the surface into sensible and latent heat fluxes as well as respiration and

photosynthetic processes. Consequently changes in vegetation amount will result in long-term changes in the local and global climates, which in turn will affect the vegetation growth as a feedback. Thus, substantial informations on vegetation canopies are needed to support the investigation of the effects of surface processes on climate processes in Sahelian region.

Remote sensing is a powerful tool to characterize vegetation status and dynamics. Radiometric measurements in the solar spectral domain contain useful information about vegetation. Analysis of remotely sensed data has revealed the existence of real possibilities for characterizing vegetation properties such as leaf area index (LAI), percentage vegetation cover, interceptive photosynthetically active radiation (IPAR), and green biomass (Asrar G., *et al.*, 1984). Remotely sensed data, however are subject to influences from the atmosphere, soil background, and especially view and sun angle geometry. This represents a real challenge for quantitative interpretations of the measurements.

The objective of the present study is to use remotely sensed data to characterize the spatial and the temporal evolution of the surface over the Hapex-Sahel square degree, during the rainy seasons of 1991 and 1992. An automatic classification was to use to discriminate different vegetation types-classes based on their temporal dynamic. Then, for some of the dominant classes within the square degree, control pixels have been defined to verify the consistency of the classification. This was performed by comparing the temporal behavior of the NDVI of a known pixel within a given class with the albedo-based NDVI, which was obtained by inversion of surface reflectances using a bi-directional reflectance model in conjunction with numerical minimization scheme. Finally, the results obtained by the classification are qualitatively compared to an actual surface map.

D.2- MATERIAL AND METHOD

Our study zone is localized in a typical sahelian zone in Southwest of Niger Republic. This study is within the framework of two international projects : the SALT (SAvanna on the Long Term) program (Menaut J-C., et Podaire A., 1990) and the HAPEX-Sahel experiment

(Goutorbe J-P., *et al.*, 1994). The objective of SALT project is to understand the dynamic of the savanna over two transects in West Africa. A latitudinal transect crosses different savanna cover types, and a longitudinal one localized in the sahelian zone. In the present investigation, we have used one of the eight ground square SALT experiment, which corresponds to the Hapex-Sahel study site. In the East and South zone of the square degree, we located three well-documented sites, where the vegetation is typically Fallow, Millet and Tiger Bush (Figure 1).

D.2-1 AVHRR Data

AVHRR data over the square degree during two years period (1991 & 1992) have used in this study. Time series were within the rainy season, from beginning of May to the end of October. Data preprocessing included accurate calibration (Teillet & Holben 1992), and atmospheric correction. Corrections of water vapor, ozone and dust content effects on surface reflectances in the visible (0.58 - 0.68 nm) and near infra-red (0.72 - 1.10 nm) spectral bands were performed using a simplified model named SMAC (Rahman & Dedieu 1992). For each years, 160 windows corresponding to 102 by 102 km, centered over the square degree have been extracted from the AVHRR scenes. Thermal infrared based method (INTUITIV : Loudjani P., *et al.*, 1994) to eliminate residual perturbations from atmospheric contamination's has been used.

D.2-2 Automatic classification

The general principle of the method is to look for clouds of points in the image, perhaps using only a sample of the pixels (Viovy N., 1990). The method is recursive, and starts from a single class representing the whole vector space. It then splits this into two dichotomous clouds and converges towards the clouds of points (Figure 2). It should be printed out that the method works on each pixel individually and does not take into account spatial relationships between pixels. A D-dimensional space $D=T \times C$ was defined, where T is the day number and C is the channel number corresponding to a given wavelength. here to NDVI. In this space $X(x_1, \dots,$

x_{ij}) represents the value of a pixel i . Areas on the ground whose cover has a particular spectral identity at a given time are represented by a cloud of points distinct from other clouds representing areas with different identities. The principle of the automatic classification is to identify these clouds of points and to subdivide the space so that each class is made up of a single cloud. Each point is then allocated to the nearest class.

At each iteration we suppose that each class is made up of two distinct clouds of points. We therefore seek an approximate centre for these two new classes, starting from the centre of the initial class and from its statistical properties. This allowed to derive a new division of the vector space. Each point is then re-allocated to one of the new classes on the basis of the newly estimated centres. Finally, we recalculate the real centre of each of the classes. A great advantage of the method is that its complexity is linearly related to the number of channels, which allows it to be used with long time series and with a large number of channels.

D.2-3 Bi-directional reflectance model

Although it is not always desirable to have off-nadir view angle measurements from remote sensing platforms because of the bidirectional effects as discussed in the previous sections, sensors with off-nadir view angles do sense more vegetation and therefore provide additional information about vegetation. This is due primarily to vegetation structure. Tall vegetation species create larger shadows, but they also expose a larger portion of their vertical structure to the sensing systems when viewed from off-nadir directions. Consequently, the off-nadir view angle measurements can be used to study the vegetation biophysical structures. In this study used a physical-based bidirectional reflectance distribution function (BRDF) model to infer vegetation biophysical characteristics with multidirectional measurements (Figure 3). We adapted a model by Rahman (Rahman H., *et al*, 1993) :

$$\rho(\Theta_s, \Theta_v, \varphi) = \rho_0 \frac{(\cos \Theta_s \cos \Theta_v)^{k-1}}{(\cos \Theta_s + \cos \Theta_v)^{1-k}} \times \frac{1 - \Theta^2}{\left[1 + \Theta^2 - 2\Theta \cos(\pi - \xi)\right]^{3/2}} \left(1 + \frac{1 - \rho_0}{1 + G}\right)$$

where G is given as

$$G = (\tan^2 \Theta_s + \tan^2 \Theta_v - 2 \tan \Theta_s \tan \Theta_v \cos \varphi)^{1/2}$$

and ξ is given as

$$\cos \xi = \cos \Theta_s \cos \Theta_v + \sin \Theta_s \sin \Theta_v \cos \varphi$$

Variables Θ_s , Θ_v and φ are the solar zenith, view zenith, and relative azimuth angles; ρ_0 is related to the surface reflectances ($0 < \rho_0 < 1$) of a flat surface mainly determined by the Lambertian part of the surface. The exponent parameter κ ($0 < \kappa < 1$) is related to the vertical structure (non-Lambertian part), while Θ is related to the orientation of the bidirectional behavior. Negative values of Θ refer to backscattering, while positive values refer to forward scattering. By inversion of this model with the multidirectional measurements, we can infer vegetation properties. For this purpose we applied the multidirectional measurements to the inversion mode of the model and inferred vegetation properties (ρ_0 , κ , and Θ) from the model-retrieved parameters (Qi J., *et al*, 1994).

D.3 - ANALYSIS AND DISCUSSION

First, a map made up of twenty one classes was derived by running the automatic classification over the two year time series (Figure 4). This map delimites the drought zone in the northwest of the square degree (red color groups : from class 1 to 7). In yellow and green (class 8 to 15) different areas where agricultural activities are identified. In the south of the square degree we note blue and violet (class 16 to 21) color groups the intensity of the temporal NDVI evolution is very important. The evolution of the profiles along the transect north - south was observed. The NDVI was higher in the south, however, the structure of the profiles seemed similar. This can be explained by the fact that the temporal distribution was the same from north to south, but the amount of rain was higher in the south. This was actually

confirmed by ground measurements of rainfall. These observations were generally confirmed by the ground control map (Valentin C., *et al.* 1992). It should be emphasized that the ground control map (Figure 1) is static, and has been derived using Spot data, which have a spatial resolution of 20 m, while the classification has been based on time series of AVHRR data at 1 km resolution. This explained the fact that many of bare soil spots, especially in the south were clearly identified in Figure 1, and were hidden in Figure 4. In the most cases however, the dominant vegetation was well located in the north and in the south. These classes represent an homogeneous behavior of the NDVI during the vegetative period. Each class seemed to determine a particular land cover or land use (see Figure 4).

Based on the ground control map, sample pixels within the dominant vegetation types (i.e. Millet fields, Fallow and Tiger Bush) were selected. Then, for the entire AVHRR data set, Rahman's model was used to derive hemispherical albedo in the red and NIR bands from AVHRR reflectances taken at consecutive days where the surface was assumed constant. Hemispherical albedos corresponding to nine solar angles were derived (0° to 80°). However, only data corresponding to nadir angles were used here. The temporal evolution of the Albedo-based NDVI, corresponding to control points within each of the dominant vegetation types was computed. In Figure 5a-5f, for each control point, the temporal evolution of albedo based NDVI (black line) was compared to that of its corresponding class (gray line). This figure shows that for each of the selected points, the two temporal behaviors of NDVI are quite similar, except in 1992, where a shift between the two maximums was detected. Different vegetation evolutions were observed for both profiles in 1991 and 1992. This can be explained by the fact that in 1992, the beginning of rainfall occurred later than in 1991. This synergy between the NDVI class evolution's and albedo-based one over the three type of observation sites suggests that the automatic classification which is based blindly on similarity in temporal evolution of the signal seemed to represent actual evolution of the vegetation. This is very important result since the classification was never confronted to real surface data.

D.4 - CONCLUSION

Automatic classifications, in conjunction with remotely sensed data have been widely used to characterize the spatial and temporal vegetation dynamics. In this study attempt has been made to investigate the significance of result obtained by such classification in terms of physical vegetation parameters (i.e., albedo). This has been performed by comparing, for

known control points at the surface, the evolution of the albedo based NDVI and that of its corresponding class. The result shows that there is similarity between the evolution of two profiles for all control points during the two years period.

Acknowledgment

This research has been performed with financial support for the SALT project. This study is situated within the framework of EOS hydrology project.

Figures captions

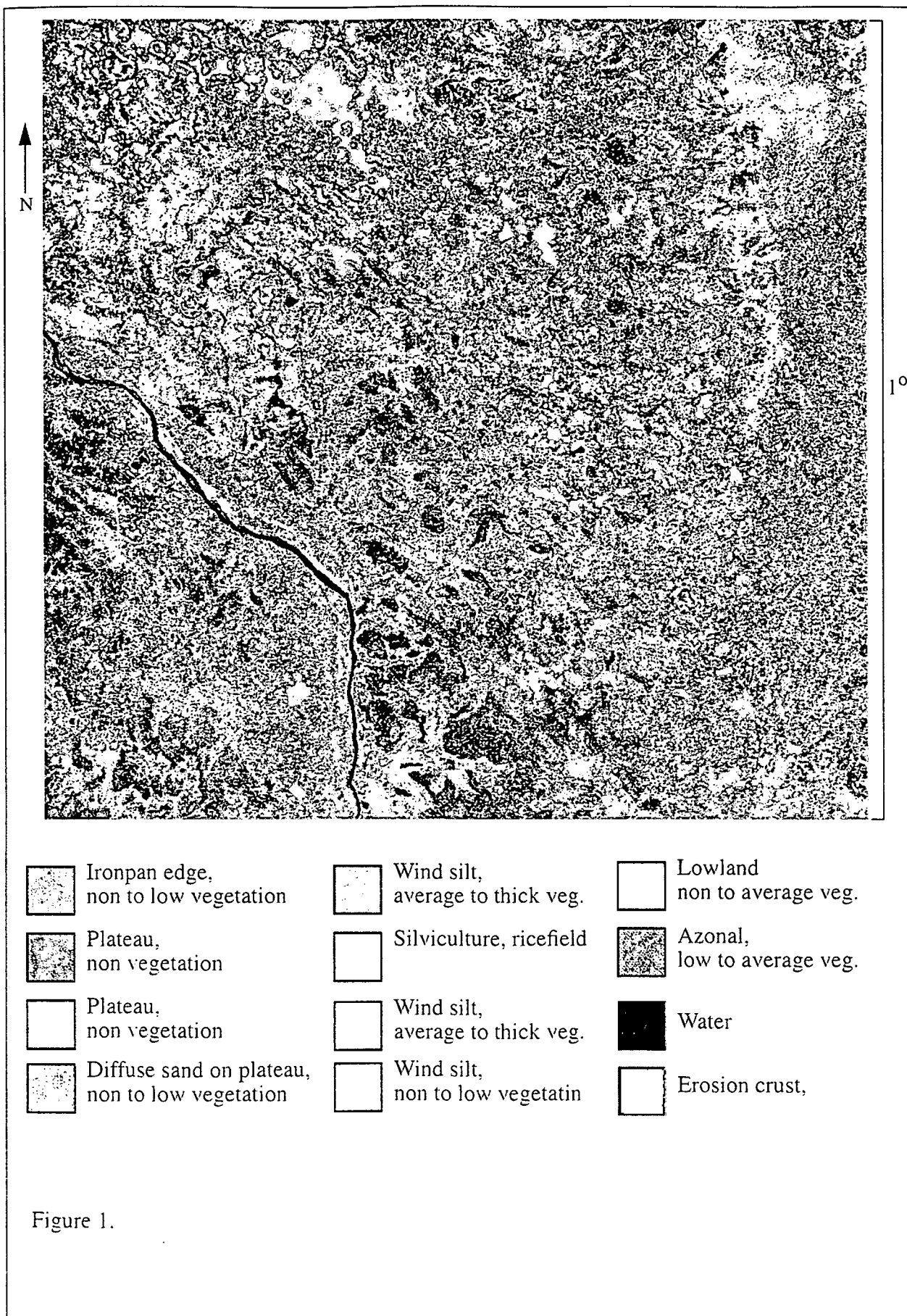
Figure 1 : Presentation of the map intituled "Etat de surface du sol, degré², Niamey Niger" (Square degree surface order, Niamey Niger) by Valentin C., et al., 1992.

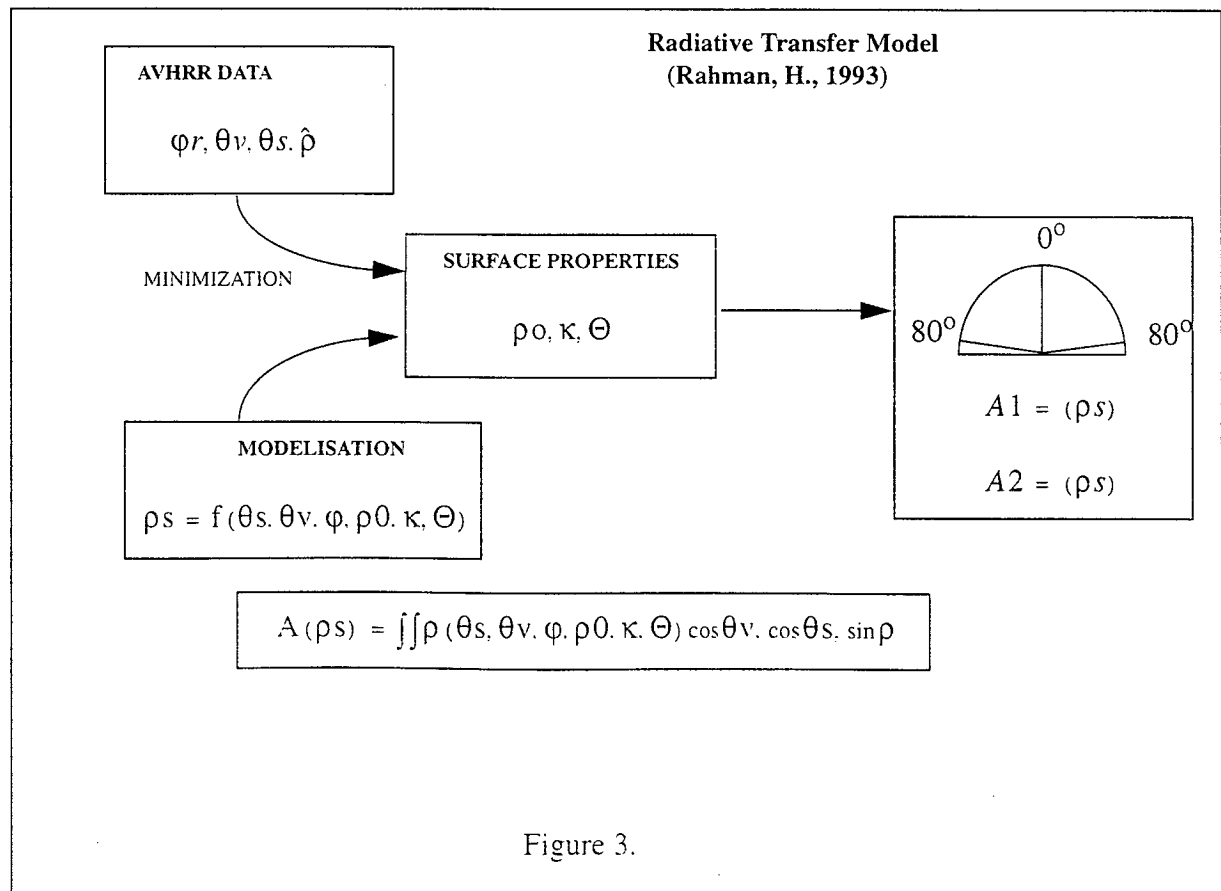
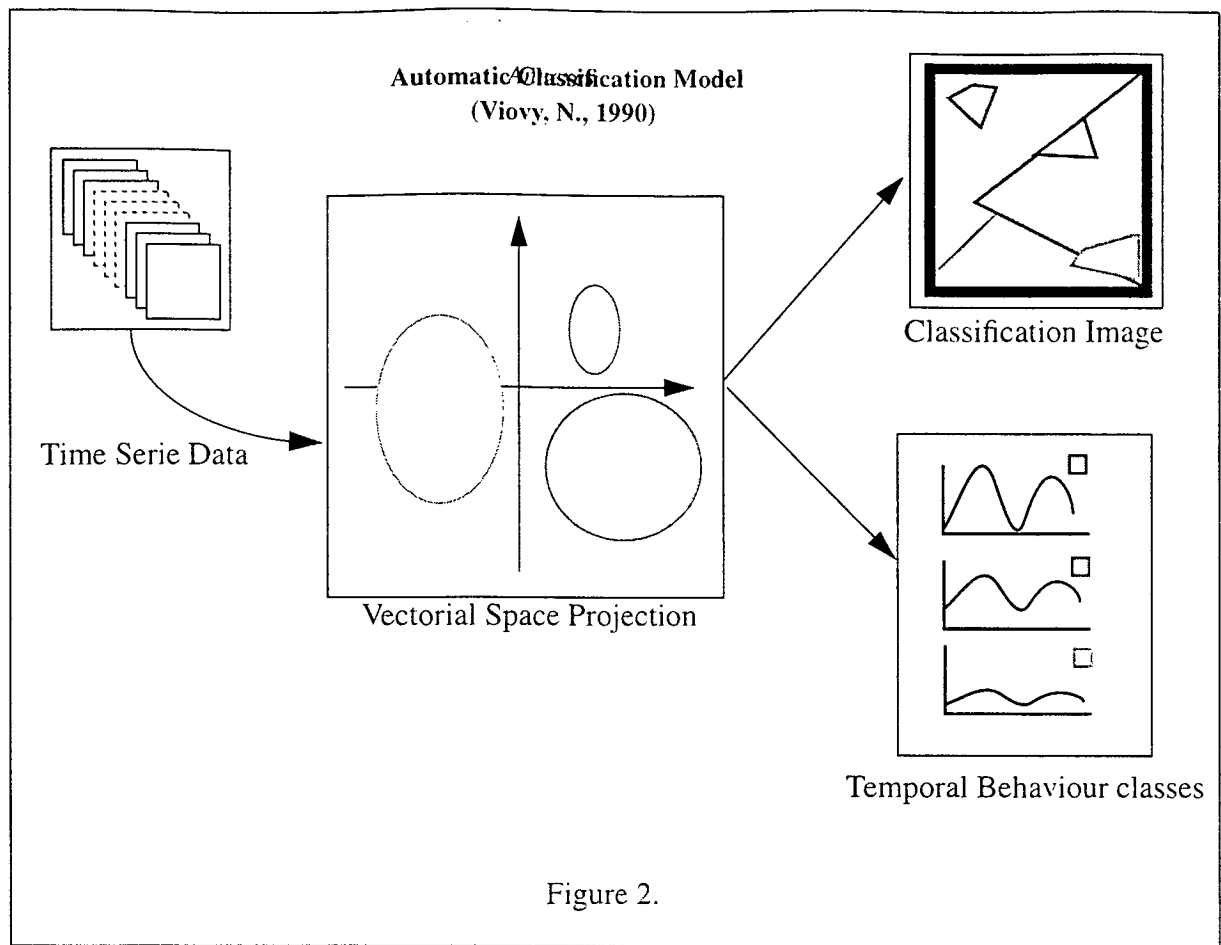
Figure 2 : Description of the automatic classification by clustering method (Viogy, 1990).

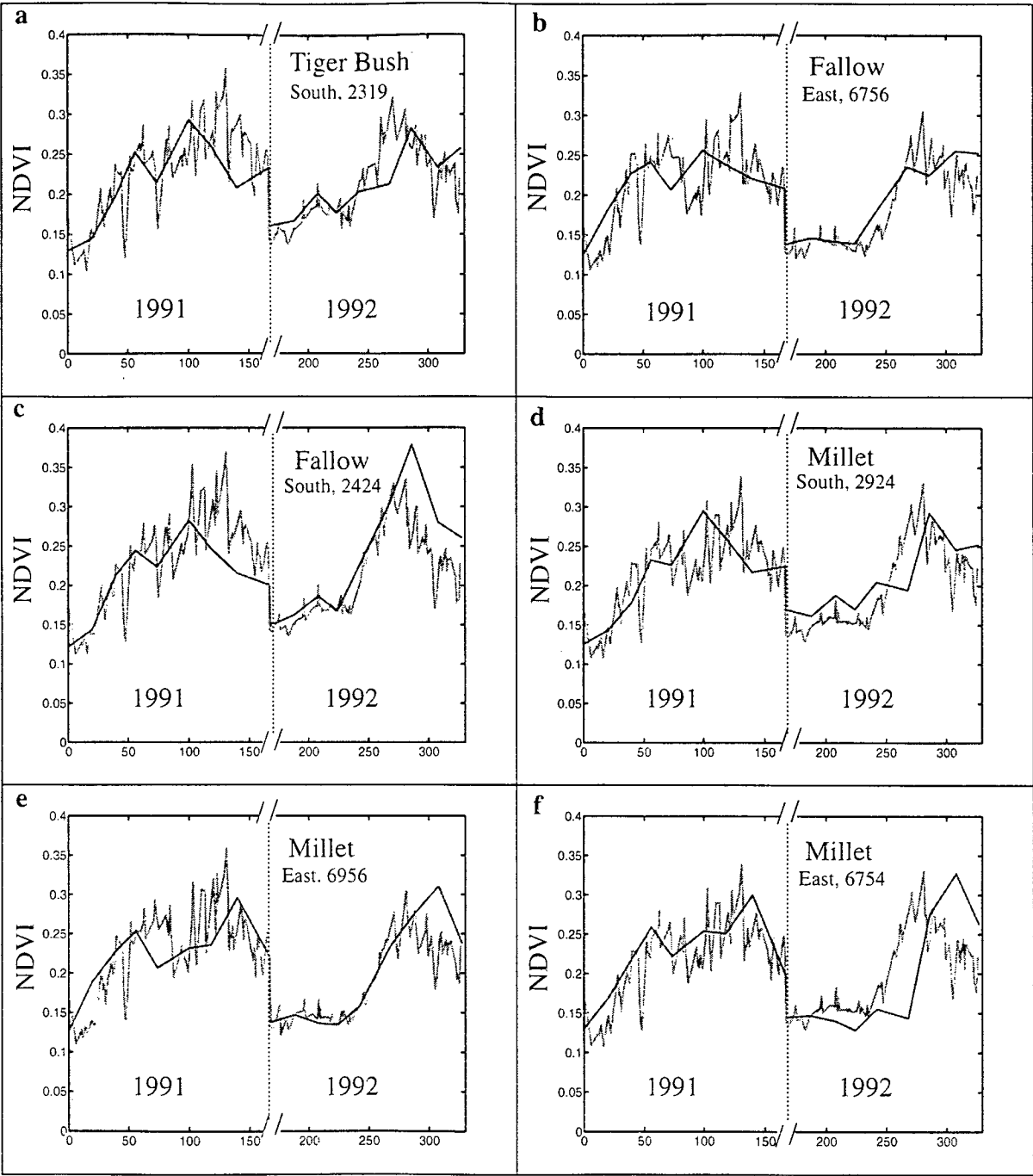
Figure 3 : Description of the radiative transfer model of Rahman et al, 1993.

Figure 4 : AVHRR automatic classification on square degree HAPEX experiment. The legend is composed by a number of class and the corresponding color. Each graph represents the mean class value and characterizes the rhythms and the intensity of the pixels group.

Figure 5 : confrontation between the output radiative transfer model (black curves) and the different class obtained by the clustering method. The plots describe the two rain season data (1991 and 1992).







AVHRR classification on the HAPEX square degree (1991-1992)

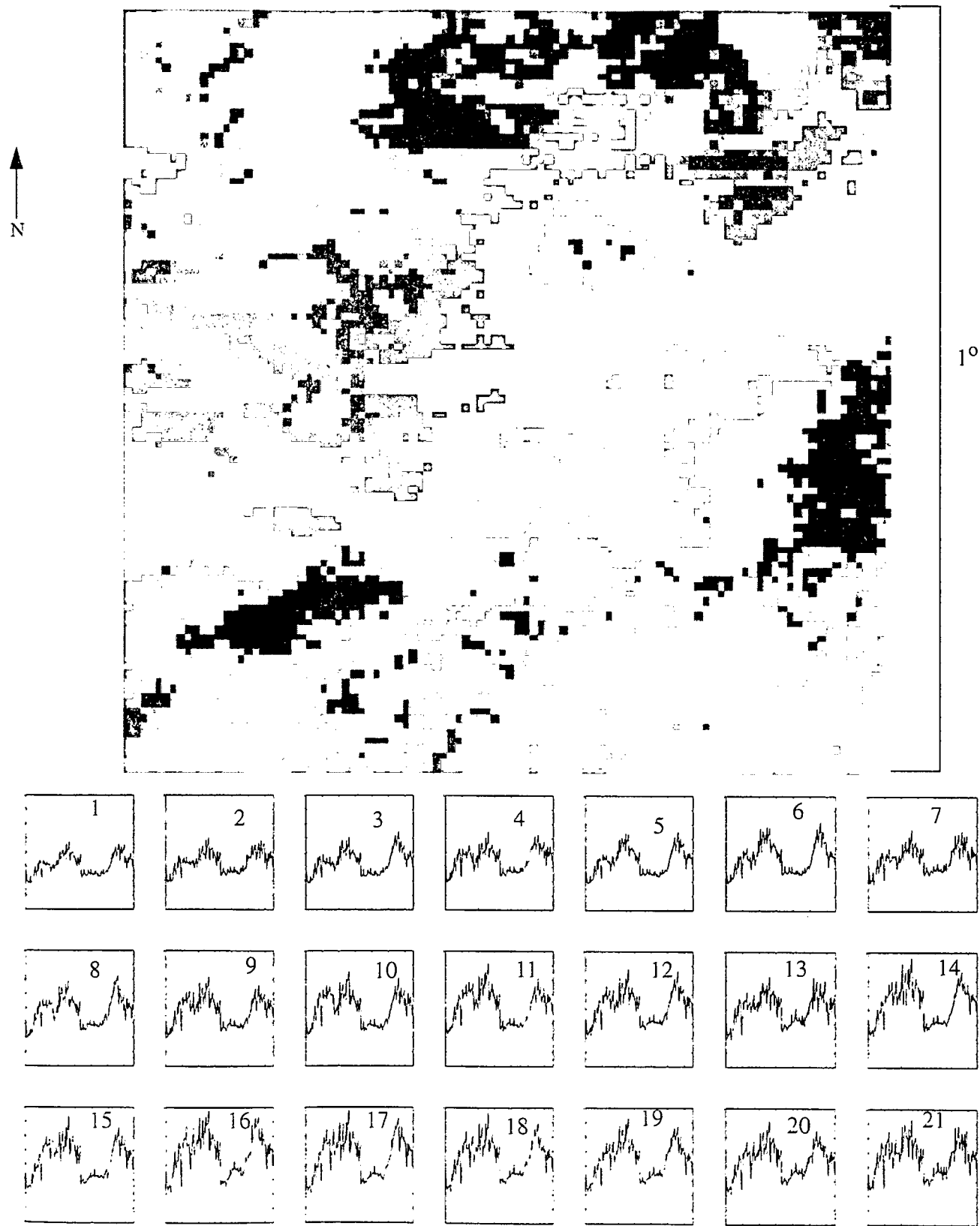


Figure 4.

D.5 - REFERENCES

Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E.T., and Hatfield, J.L., 1984, Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat, *Agron. J.*, 76, pp 300-306.

Goutorbe, J-P., Lebel, T., Tinga, A., Bessemoulin, P., Brouwer, J., Dolman, A., Engman, E., Gash, J., Hoepffner, M., Kabat, P., Kerr, Y., Monteny, B., Prince, S., Said, F., Sellers, P. and Wallace, J., 1994, HAPEX-Sahel : a large scale study of land-atmospheric interactions in the semi-arid tropics, *Ann. Geophysicæ* 12, 53-64.

Loudjani, P., Cabot, F., Gond, V., and Viovy, N., 1994, Improving NDVI Time-series Using Imposed Threshold on Irt, Ir and Visible values (INTUITIV) : a method for reducing cloud contamination and noise in NDVI time-series over tropical and sub-tropical regions, Sixth international symposium, physical measurements and signatures in remote sensing, Val d'Isère, France.

Menaut, J-C., and Podaire, A., 1990, Projet SALT: analyse de la dynamique des changements de paysages des savanes d'Afrique de l'Ouest: mécanismes sous-jacents et spatialisation des processus, Comité Ecosystèmes du Programme Français Géosphère-Biosphère, 71 pages.

Qi, J., Huete, A., Cabot, F., and Chehbouni, A., 1994, Bidirectional properties and utilizations of high-resolution spectra from a semiarid watershed, *Water resources research*, Vol. 30, n° 5, pp 1271-1279.

Rahman, H., and Dedieu, G., 1992, SMAC: a simplified method for atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum, submitted to *Int. J. Remote Sensing*, 1992

Rahman, H., Verstraete, M., and Pinty, B., 1993, A coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model. Part 2 : semi-empirical model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer data. *J. Geophys. Res.*, 98: 20791-20801.

Teillet, P., and Holben, B., Towards operational radiometric calibration of NOAA-AVHRR imagery in the visible and Infrared channels, submitted to the Canadian J.R.S, 5-4-1993

Valentin, C., Courault, D., D'Herbes, J.M., and Timouk, F., 1992, Etats de surface du sol, degré2 Niamey Niger, Orstom/Agrhymet.

Viovy, N., 1990, Etude spatiale de la biosphère terrestre : intégration de modèles écologiques et de mesures de télédétection, Thèse INPT, 213 pages, Toulouse.

ANNEXE E : TABLEAU DE REPARTITION DES PIXELS HOMOGENES AVHRR
DANS LES CLASSES SPOT

Tableau 1 : pixel AVHRR composé à 90 % par une seule classe SPOT

Pixels AVHRR			nb de pixels SPOT	Classes SPOT													
lig	col	class		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
45	42	9	3025	0	2758	211	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	43	9	3025	22	2938	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	44	9	3025	88	2937	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	42	1	3025	9	2930	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	43	2	3025	0	2804	220	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	46	2	3025	2916	108	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
48	41	9	3025	2738	287	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	42	9	3025	0	2871	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	44	1	3025	2951	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	41	1	3025	16	3009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	43	1	3025	2966	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	46	1	3025	42	2944	26	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	41	2	3025	38	2987	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	45	1	3025	83	2920	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	47	3	3025	133	2761	79	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	51	9	3025	2774	236	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0
56	47	1	3025	176	2837	1	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	78	4	3025	0	0	0	0	0	2729	5	0	0	210	8	1	0	0
57	64	3	3025	2731	277	1	0	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0
58	39	3	3025	8	2783	234	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	41	1	3025	2790	235	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 1 : pixel AVHRR composé à 90 % par une seule classe SPOT

Pixels AVHRR			nb de pixels SPOT	Classes SPOT													
lig	col	class		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
45	42	9	3025	0	2758	211	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	42	1	3025	2835	190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	46	9	3025	0	2959	14	0	0	0	52	0	0	0	0	0	0	0
59	39	3	3025	172	2824	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	44	1	3025	5	2856	156	1	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0
60	43	1	3025	41	2770	185	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	44	1	3025	252	2770	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	47	9	3025	2906	119	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	44	2	3025	37	2925	3	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0
62	39	1	3025	7	2851	131	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0
63	48	1	3025	9	2935	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	44	1	3025	2	2981	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	45	1	3025	57	2782	167	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0
63	62	2	3025	2887	124	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0
65	43	2	3025	197	2808	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	57	2	3025	49	2773	83	3	0	0	78	0	0	0	38	1	0	0
66	77	4	3025	7	0	0	0	2969	0	0	19	3	0	0	0	0	0
67	76	6	3025	22	51	2	0	2936	3	1	0	1	0	0	0	0	0
68	37	1	3025	44	2903	77	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
68	76	13	3025	22	14	0	6	2946	0	0	5	15	0	4	13	0	0
87	74	13	3025	0	0	0	0	0	0	0	0	39	5	134	0	4	2798
89	75	13	3025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82	208	0	0	2735